

Cristian García, Juan Diego Valladolid (UPS)  
Mary Vergara y Francklin Rivas (ULA)  
(Editores)

# Desarrollo tecnológico en ingeniería automotriz

Universidad Politécnica Salesiana

# **Desarrollo tecnológico en ingeniería automotriz**



*Cristian García y Juan Diego Valladolid (UPS),  
Mary Vergara y Francklin Rivas (ULA)  
Editores*

# Desarrollo tecnológico en ingeniería automotriz



2017



## DESARROLLO TECNOLÓGICO EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

© Cristian García y Juan Diego Valladolid (UPS), Mary Vergara y Francklin Rivas (ULA) (Editores). Co-autores: Ángel Yasmany Aguilar R., Carlos Andrade, Christian X. Barreto Cajamarca, Andrés Berrezueta, Andrea K. Bermeo Naula, Pedro E. Cabrera Bravo, Paul Vicente Carchi R., Jairo D. Castillo Calderón, Carlos C. Cepeda Landín, Wilmer Contreras, Juan F. Chica Ortiz, Gustavo M. Domínguez, Efrén Fernández, Iván Ernesto Fernández L., Edgar Patricio Fernandez A., Renato Fierro J., Milton García, Cristian L. García García, Danilo A. Gárate Montalvo, Galo A. Guachanamá, Xavier Guamán, David Idrovo, Hugo Santiago Inga I., Cristian Jérez, Daniel A. León, hon Edward Lizarazo, Christian Loayza, Walter López R., Oswaldo S. Ortega, J. Paúl Ortiz, Jean Pineda, Juan A. Rivera Caravajo, Néstor Diego Rivera C., Steven R. Ronquillo Ronquillo, Luis Romeral, José Miguel Segnini, Omar Sigüenza, Adrián Siguenza, Cristian Siguencia, Christian Torres T., Luis Enrique Urgiles S., Luis Valdiviezo C., Mary Josefina Vergara, Luis P. Zhunio Lituma

1ra edición: Universidad Politécnica Salesiana  
Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja  
Cuenca-Ecuador  
Casilla: 2074  
P.B.X. (+593 7) 2050000  
Fax: (+593 7) 4 088958  
e-mail: rpublicas@ups.edu.ec  
www.ups.edu.ec

Área de Ciencia y Tecnología  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ  
Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte (GIIT)

ISBN: 978-9978-10-288-6

Derechos de autor: 052633

Depósito legal: 006034

Coordinador: Juan Diego Valladolid

Edición, diseño,  
diagramación  
e impresión Editorial Universitaria Abya-Yala  
Quito-Ecuador

Tiraje: 300 ejemplares

Impreso en Quito-Ecuador, diciembre de 2017

Publicación arbitrada de la Universidad Politécnica Salesiana

Prólogo .....	11
Dispositivos de carburo de silicio en sistemas de tracción eléctrica <i>Efrén Fernández y Luis Romeral</i> .....	13
Diseño e implementación de un controlador de presión de combustible en un motor Otto utilizando “realimentación de estados” <i>Juan D. Valladolid, Galo A. Guachanamá y Gustavo M. Domínguez</i> .....	37
Metodología para la implementación de índices de mantenimiento CMD para sistemas ferroviarios <i>Renato Fierro J., Milton García y Christian Torres T.</i> .....	57
Obtención de la cartografía del tiempo de inyección de una ECU <i>Wilmer Contreras y Carlos Andrade</i> .....	75
Análisis de la influencia en la calibración de las bujías en los gases de escape de un motor de ciclo Otto <i>Juan Diego Valladolid Q., Luis Enrique Urgiles S., Edgar Patricio Fernández A. y Paul Vicente Carchi R.</i> .....	103
Monitoreo y control de sistemas activos del vehículo basado en el bus de comunicación CAN <i>J. Paúl Ortiz, Oswaldo S. Ortega y Daniel A. León</i> .....	125
Optimización del sistema de mantenimiento del equipo caminero a través de la gestión por procesos <i>Renato Fierro J., Walter López R. y Luis Valdiviezo C.</i> .....	155

Reducción de NO <sub>x</sub> de un motor CRDi mediante el control difuso de la válvula EGR <i>Wilmer Contreras, Xavier Guamán y Omar Sigüenza.....</i>	185
Estimación de la presión de compresión de un MEC mediante el uso de RNAR y PCA <i>Wilmer Contreras, Cristian Jérez, Jean Pineda y Cristian Garcia....</i>	209
Implementación académica de un DAQ para disminución de desbalance en equipos rotativos <i>Jhon Edward Lizarazo, José Miguel Segnini y Mary Josefina Vergara.....</i>	229
Análisis de fallas del sistema de inyección electrónica de combustible Multec Delphi <i>Néstor Diego Rivera C., Iván Ernesto Fernández L., Hugo Santiago Inga I. y Ángel Yasmany Aguilar R.....</i>	249
Análisis de modos de falla, efectos y criticidad del sistema de inyección del motor C14NE <i>Néstor Rivera, Cristian García, Yasmany Aguilar y Fernando Tandazo .....</i>	267
Aplicaciones de máquinas de soporte vectorial en el diagnóstico de motores de combustión <i>Néstor D. Rivera Campoverde, Christian X. Barreto Cajamarca y Luis P. Zhunio Lituma.....</i>	289
Detección de fallas incipientes a través del análisis de vibraciones mediante tiempos cortos en un motor Sonata EF 2.0 <i>Néstor D. Rivera Campoverde, Steven R. Ronquillo Ronquillo, Pedro E. Cabrera Bravo y Andrea K. Bermeo Naula.....</i>	311
Diagnóstico de fallos del sistema de inyección de un motor de encendido provocado mediante inteligencia artificial <i>Néstor D. Rivera Campoverde, Cristian L. García García, Carlos C. Cepeda Landin y Juan A. Rivera Caravajo .....</i>	337

Propuesta de un GMAO para la gestión del mantenimiento de un sistema ferroviario <i>Milton García, Renato Fierro, Andrés Berrezueta y Cristian Sigüenza</i> .....	361
Diagnóstico de fallas en motores de combustión interna mediante termografía usando lógica difusa <i>Néstor D. Rivera Campoverde, Jairo D. Castillo Calderón, Ángel Y. Aguilar Romero y Andrea K. Bermeo Naula</i> .....	379
Detección de fallas en un motor de combustión interna Hyundai Sonata 2.0 EF mediante análisis de componentes independientes <i>Néstor D. Rivera Campoverde, Danilo A. Gárate Montalvo y Juan F. Chica Ortiz</i> .....	397
Influencia de la viscosidad del lubricante como sellante de holguras en las válvulas de un motor de combustión interna mediante análisis de vibraciones y emisiones contaminantes <i>Milton García, Adrián Sigüenza, Pablo Maxi y Luis Mendoza</i> .....	415
Costos energéticos de los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca <i>Adrián Sigüenza, Milton García, Christian Loayza y David Idrovo</i> .....	437



*Lo importante en la ciencia no es tanto  
obtener nuevos datos, sino descubrir  
nuevas formas de pensar sobre ellos.*

William Lawrence Bragg

*Si al principio una idea no es completa-  
mente absurda, no existe la menor espe-  
ranza de lograr algo a partir de ella.*

Michio Kaku

*Investigar es ver lo que todo el mundo  
ha visto, y pensar lo que nadie más  
ha pensado.*

Albert Szent Gyorgi



El proceso de investigación y desarrollo tecnológico está directamente relacionado con una adecuada metodología de procesos industriales, que cada vez son más exigentes en competitividad, eficiencia energética y de normativas ambientales. Reflejando un fuerte impacto sobre la sociedad, educación y la industria. Este libro contempla resultados de un proceso de investigación y desarrollo de nuevas técnicas aplicadas en el campo de la ingeniería automotriz desde cuatro aristas: eficiencia energética y contaminación ambiental, planificación del transporte, ingeniería del mantenimiento aplicada al transporte y desagregación tecnológica.

La innovación que ha ido transformando nuestra sociedad, se sostiene en la aplicación de conceptos teóricos sobre el conocimiento que se tiene acerca del campo automotriz. Si se piensa en todos los cambios que se viene con respecto a nuevas formas de transporte en nuestro país, con el incremento progresivo de vehículos híbridos, eléctricos y formas de movilidad alternativa. Es imperativo que se desarrollen nuevas técnicas de análisis de estos cambios a fin de generar nuevos conocimientos acerca de las nuevas tecnologías. De esta rápida visión se deduce que nuevos conocimientos junto con el dominio de teorías son importantes para obtener mejores resultados que intervienen en las propuestas para solución de problemas o mejoras de los sistemas.

Desde el punto de vista académico, se ha desarrollado estrategias que han sido incorporadas en diferentes campos de acción de la ingeniería automotriz, ya sea como la colaboración en actividades de los grupos de investigación y la participación de proyectos que busquen nuevas propuestas de mejora de la calidad de productos y procesos.



Este libro recoge las experiencias y resultados obtenidos asociados con el desarrollo tecnológico en ingeniería automotriz. Para lograr este objetivo, se ha convocado a la comunidad científica, académica y profesionales de la industria automotriz, a enviar sus propuestas para la inclusión como capítulo de este libro. Cada capítulo fue sometido a revisión, evaluación y aprobación por un comité científico altamente calificado, proveniente de 6 países (Colombia, Ecuador, España, Guinea Ecuatorial, México y Venezuela).

Este trabajo ha sido posible gracias al gran apoyo la Universidad Politécnica Salesiana (UPS sede Cuenca), Ecuador y Universidad de los Andes (ULA), Venezuela. Agradecemos el importante aporte de cada las instituciones participantes, así como también a los autores, revisores y editores de este libro que estamos seguros contribuirá con la generación de nuevas expectativas en el progreso investigativo.

*Ing. Juan Diego Valladolid, MSc.  
Universidad Politécnica Salesiana*

# Dispositivos de carburo de silicio en sistemas de tracción eléctrica<sup>1</sup>

Efrén Fernández<sup>2</sup>

Luis Romeral<sup>3</sup>

Motion Control and Industrial Applications Group (MCIA)  
Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña  
Centro de Investigación ERGON de la Universidad del Azuay

## Resumen

En la última década el cambio tecnológico y el crecimiento económico en los sectores de la automoción han contribuido en la generación de nuevas líneas de investigación entre fabricantes y universidades. Estas líneas de investigación se enfocan en el desarrollo y optimización de prototipos de sistemas de tracción para vehículos híbridos y eléctricos. Además, dichas investigaciones se centran en la búsqueda de sistemas con una mejor eficiencia energética y mayor rendimiento. En consecuencia, los esfuerzos se orientan a buscar sistemas de tracción eléctrica compactos en donde la relación de peso/volumen sea reducida, por lo tanto la potencia de disipación pueda ser mejorada. Actualmente, el uso de nuevas tecnologías y materiales de banda prohibida como el carburo de silicio (SiC) permiten mejorar las condiciones de operación de los convertidores de potencia en comparación con los sistemas implementados con dispositivos de silicio. Los dispositivos de SiC permiten trabajar a alta frecuencia de operación, con bajas pérdidas de potencia e incrementar el rango de operación a mayores temperaturas. Por otra parte, debido a que las pérdidas de potencia se reducen la eficiencia de los convertidores se incrementa. El siguiente texto presenta un análisis actual de los dispositivos de conmutación SiC, un estudio de topologías de convertidores y la optimización de los mismos basada en dispositivos de carburo de silicio (SiC) usados en sistemas de tracción eléctrica.

## Palabras clave

Carburo de silicio, convertidores, alta frecuencia, VSI, CSI, Quasi-Z.

- 1 Agradecimiento: este trabajo fue apoyado en parte por la Secretaría Nacional del Ecuador de Ciencia y Tecnología SENESCYT del Gobierno ecuatoriano y al Ministerio de Economía y Competitividad de España, en el marco del proyecto de investigación TRA2016-80472-R.
- 2 Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Candidato PhD en Ingeniería Electrónica, área de estudios en sistemas de tracción eléctrica (efren.fernandez@mcia.upc.edu).
- 3 Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Director General del Centro de Investigación MCIA (luis.romeral@mcia.upc.edu).

**Abstract**

*Over the last decade, technological changes and economic growth in automotive sectors have contributed to the new research lines generation between manufacturers and universities. These research lines focus mainly on the prototypes development and optimization for hybrid and electric vehicle traction systems. In addition, these research concentrate on the search for better energy efficiency and higher performance systems. Accordingly, the efforts are engrossed on finding compact electric traction systems where the volume/weight ratio is reduced, therefore, the power dissipation can be improved. Nowadays, the wide-bandgap technologies such as silicon carbide (SiC) allow improving the operating conditions of power converters compared with traditional silicon counterparts. SiC devices enable high-frequency operation with low total power losses and increase the operating range at higher temperatures in power converters. Besides, due to the power losses are reduced, the converter efficiency can be improved. The following chapter presents a power switching devices analysis, a converter topologies study and the power converters optimization based on silicon carbide (SiC) devices applied in electric traction systems.*

**Keywords**

*Silicon Carbide, Converters, High Frequency.*

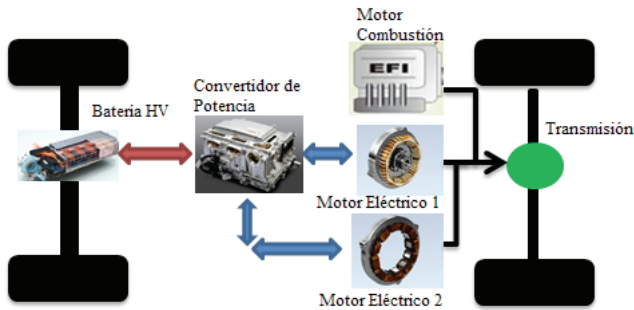
## Introducción

En la actualidad la investigación en topologías de inversores de potencia más eficientes ha mejorado considerablemente el desarrollo de los sistemas de tracción en vehículos eléctricos. En particular, las tareas se concentran en buscar sistemas de inversores más ligeros, compactos y eficientes en cuanto a potencia, temperatura y frecuencia de trabajo. Según el reporte técnico presentado por el fabricante Toyota, en mayo de 2014, donde dan a conocer los nuevos desarrollos del sistema de tracción del modelo Prius, el tamaño del convertidor se ha reducido un 80% con la utilización de elementos SiC (carburo de silicio), y las pérdidas de potencia han disminuido hasta 4 veces con respecto a la primera generación THS (Toyota Hybrid System) del modelo en el mercado (Toyota Motor Corporation 2014).

El sistema de tracción de un vehículo híbrido (HEV) basa su funcionamiento en el accionamiento de motores eléctricos gobernados por un convertidor de potencia y un motor a combustión. Este convertidor permite elevar la tensión de la batería que alimenta el sistema mediante una etapa de conversión DC/DC tipo Buck-Boost, usando la electrónica de potencia y generar una corriente alterna en tres fases para conseguir el movimiento de los motores eléctricos (figura 1). Además, la topología del convertidor

permite la operación de los motores eléctricos en modo generador, llevando la carga resultante hasta la batería del sistema (Augeri 2010).

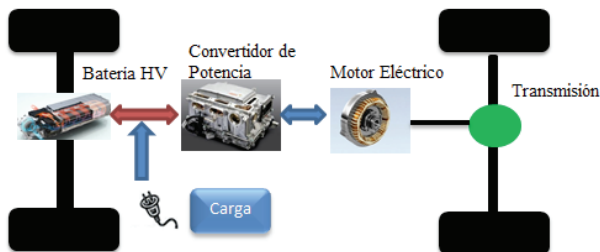
Figura 1  
Arquitectura de vehículo híbrido en paralelo HEV



Fuente: los autores

En un vehículo eléctrico (EV) el convertidor cumple con las mismas funciones, con control sobre el motor que también es generador, todo esto gobernado por la topología implementada internamente en el convertidor. Además, se adapta el sistema de carga enchufable o *plug in*, para cargar la batería:

Figura 2  
Arquitectura de vehículo eléctrico *plug in*



Fuente: los autores

Los nuevos dispositivos de carburo de silicio (SiC) presentan mejoras con respecto a los semiconductores de silicio como el voltaje de bloqueo, el aumento en la temperatura de trabajo y frecuencia de conmutación. La comparación de estos materiales es presentada en la siguiente tabla:

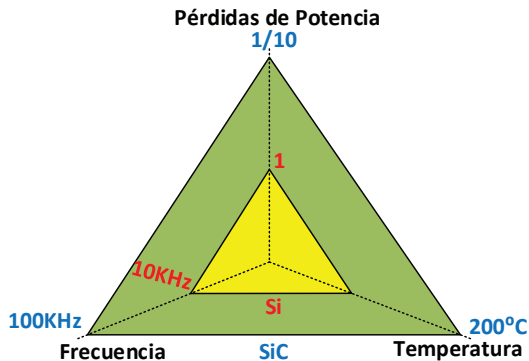
Tabla 1  
Características del SiC vs Si

Características	4H SiC	Silicio
Ec. Campo Eléctrico [V/cm]	0.3	3
Eg Energía Banda prohibida [eV]	3.2.6	1.12
$\lambda$ Conductividad Térmica [W/(cm K)]	4.9	1.5
$\mu$ Movilidad Electrón [cm <sup>2</sup> /(Vs)]	900	1400

Fuente: Vrtovec y Trontelj, 2014

Si se establece una comparación entre los dos materiales, las ventajas del SiC con respecto al Si son indudablemente superiores. En consideraciones de operación y eficiencia se puede establecer que los dispositivos de SiC reducen las pérdidas de potencia, permiten trabajar a alta frecuencia de conmutación e incrementan el rango de temperatura de operación:

Figura 3  
Comparación de rangos de operación SiC vs. Si



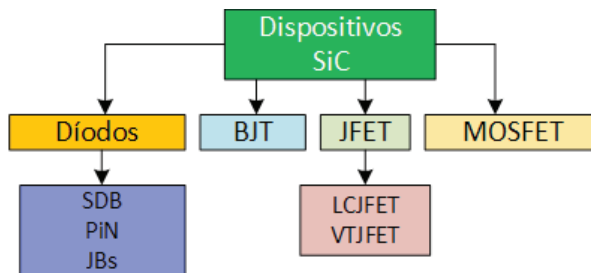
Fuente: los autores

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la segunda sección se presenta una breve reseña de los dispositivos SiC presentes en el mercado. En la tercera sección se detallan las topologías de convertidores utilizadas en sistemas de tracción eléctrica. La sección cuatro presenta la optimización de las topologías utilizadas en sistemas de tracción eléctrica; además, se realiza un análisis comparativo de las topologías SiC vs Si, incluyendo las pérdidas de potencia y de eficiencia. Finalmente en la sección cinco se presenta las conclusiones y discusiones.

## Dispositivos de carburo de silicio

Los dispositivos semiconductores de carburo de silicio se encuentran dentro de los semiconductores de potencia de banda prohibida, los elementos más utilizados en convertidores de potencia son los Mosfet y diodos Sckotty. Los fabricantes han trabajado en el desarrollo de diferentes dispositivos para aplicaciones en sistemas de potencia. En función de la variedad de dispositivos se puede presentar la siguiente clasificación de los dispositivos SiC:

Figura 4  
Clasificación de dispositivos SiC



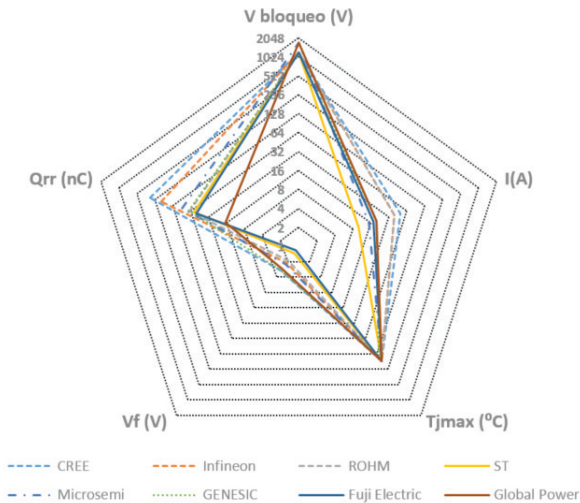
Fuente: los autores

Los diodos SiC tienen las ventajas de la recuperación de inversa y las pérdidas de conmutación que son pequeñas. Estos tienen gran independencia de la carga de recuperación inversa ( $Q_{RR}$ ) y de la unión

térmica. Este parámetro en estos dispositivos es muy bajo si se compara con los de silicio convencional, además, tienen un coeficiente de temperatura negativo que disminuye las EMI (Jahdi *et al.*, 2014). Estos sistemas manejan rangos de voltaje y corrientes hasta diez veces más que los dispositivos de silicio convencional.

La figura 5 presenta un análisis de rangos de operación y las características principales de funcionamiento de los diodos SiC por parte de los fabricantes más conocidos en el mercado actual.

Figura 5  
Propiedades de diodos de carburo de silicio rangos de operación



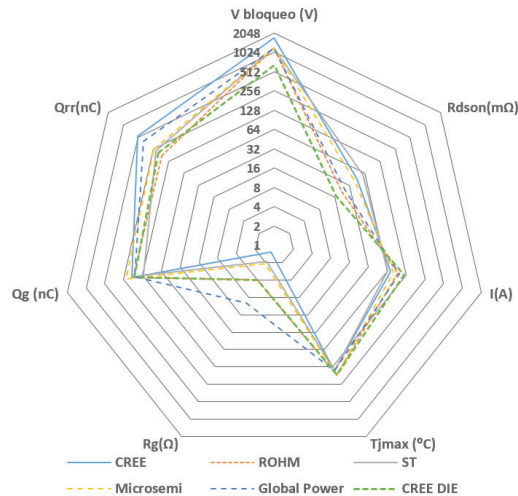
Fuente: los autores

El Mosfet de SiC combina el comportamiento normalmente apagado, por un lado, y la unión control-voltaje controlada-fuente, por otro lado (Rabkowski *et al.*, 2012). Por lo tanto, es un dispositivo de potencia favorable para los diseñadores de convertidores de electrónica de potencia en comparación con el JFET SiC normalmente encendido y el BJT de

SiC, que tienen ambos inconvenientes desde la perspectiva de sistemas y emplean simples circuitos de control.

Los rangos de funcionamiento de estos dispositivos son muy amplios. En la figura 6 se presenta un análisis de las propiedades y rangos de trabajo de los fabricantes de estos dispositivos.

**Figura 6**  
Propiedades de Mosfet de carburo de silicio rangos de operación



Fuente: los autores

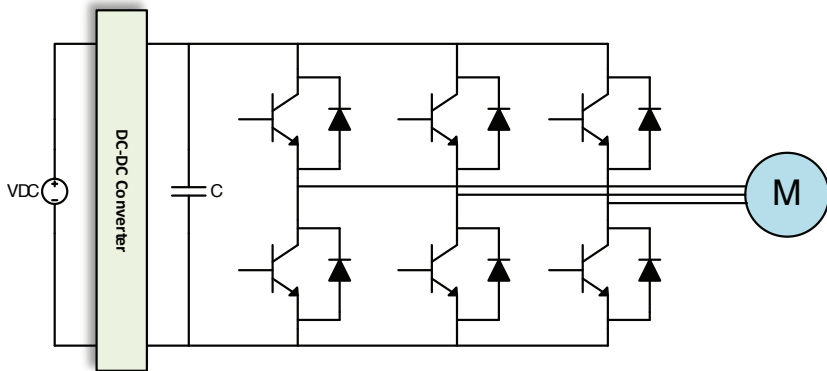
## Topologías de convertidores para sistemas de tracción eléctrica

Por lo general, existen tres tipos de topologías de convertidores que son referenciadas con mayor frecuencia dentro de investigaciones y estudios, estas son la topología de convertidor con fuente de voltaje (VSI), la topología con fuente de corriente (CSI) y la topología con red de impedancia Z, siendo la topología VSI la que se ha consolidado entre las marcas a nivel de fabricantes.



El inversor de voltaje VSI es la topología más utilizada en sistemas de tracción eléctrica (Muhsen *et al.*, 2015; Wrzecionko *et al.*, 2014; Hai-zhong *et al.*, 2012). Las baterías son los dispositivos de almacenamiento de energía de vehículos eléctricos e híbridos que brindan el voltaje DC de entrada al convertidor (figura 7). La topología del VSI consiste de una fuente DC, tres ramales de conmutación y un condensador de alta capacidad. En cada rama existen dos elementos de activación que pueden ser transistores de potencia.

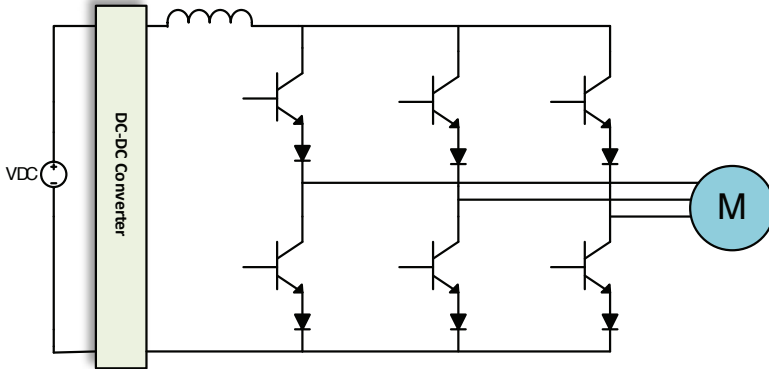
Figura 7  
Topología de convertidor con fuente de voltaje VSI



Fuente: los autores

El inversor con fuente de corriente (CSI) actualmente está siendo considerado para aplicaciones en sistemas de tracción eléctrica, como lo presenta Jun Lee (*et al.*, 2013). La topología CSI (figura 8) ofrece ventajas importantes: no necesita diodos anti-paralelos en los interruptores, proporciona acción natural de protección contra cortocircuitos, suministra voltajes en forma de senoide al motor debido al efecto de los filtros capacitivos de salida de AC y puede aumentar la tensión de salida a un nivel más alto que el voltaje de la fuente, para activar el motor a velocidades más altas.

Figura 8  
Topología de convertidor con fuente de corriente CSI

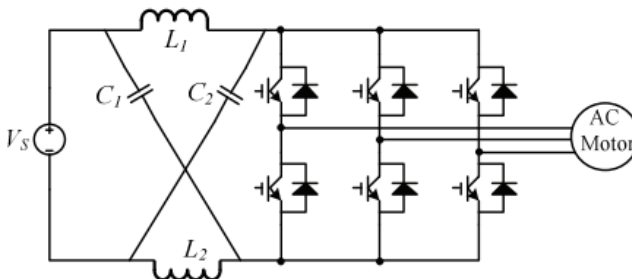


Fuente: los autores

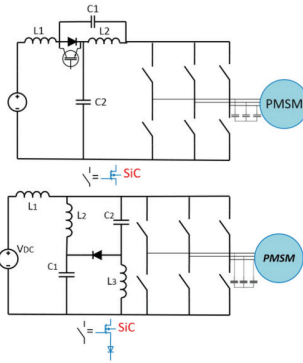
El inversor con red de impedancia  $Z$  y Quasi  $Z$  (figuras 9a y 9b) analizados por Battiston (*et al.*, 2014), pueden trabajar con fuente de voltaje o corriente. La función de la red de impedancia es amortiguar el acople de la fuente con el inversor, además, facilita un cortocircuito y un circuito abierto en cualquier momento, dependiendo de la situación de accionamiento y operación del convertidor.

Figura 9  
Topología de convertidores con redes de impedancia

a) Topología de convertidor con fuente  $Z$



## b) Topología de convertidor con fuente Quasi-Z



Fuente: los autores

En el desarrollo de convertidores de potencia al acoplar las redes de impedancia como elemento o fuente de entrada la tensión puede ser aumentada mediante el control de los disparos a través de tiempos de intervalo del convertidor, es decir, no existe la necesidad de un convertidor DC/DC (Siwakoti *et al.*, 2015), lo que hace a esta topología tipo *buck-boost*. La aplicación de estas topologías para convertidores en sistemas de tracción eléctrica de a poco va tomando fuerza, por las ventajas descritas anteriormente y se le considera como una topología emergente dentro de estos sistemas.

## Optimización de topologías de convertidores con dispositivos SiC

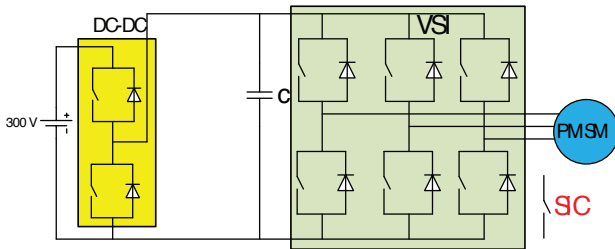
En este apartado se presenta un análisis de diferentes topologías de convertidores de potencia utilizadas en sistemas de tracción eléctrica y son implementadas con dispositivos de SiC a alta frecuencia de conmutación (100 kHz). El objetivo principal es validar y optimizar dichas topologías, reduciendo las pérdidas de potencias y tamaño de los elementos pasivos. El análisis incluye un estudio comparativo de las topologías implementadas con SiC y silicio convencional para validar

las propiedades anteriormente descritas. Las topologías propuestas para realizar el análisis se muestran en la figura 10, las cuales consisten en topologías VSI, CSI y Quasi Z con elementos de carburo de silicio.

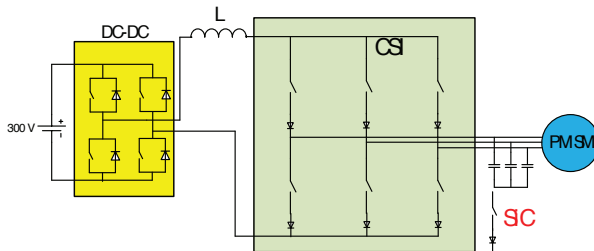
Figura 10

Topologías de convertidores SiC propuestos para el análisis

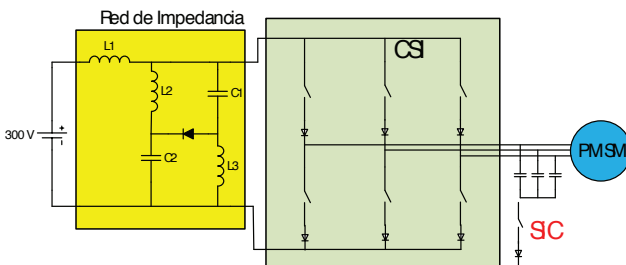
a) Topología VSI con elementos SiC



b) Topología CSI con elementos SiC



c) Topología Quasi Z con elementos SiC



Fuente: los autores

La selección y características de los dispositivos SiC utilizados para el análisis son presentadas en la tabla 2. Para la selección se consideraron diferentes aspectos como voltajes y corriente de operación máxima, los cuales, para sistemas de tracción, por lo general se encuentran entre 450V 40 amperios. Bajo estas características y por el análisis desarrollado en el primer apartado, se ubican fabricantes que cumplan con estas especificaciones.

Los modelos de los dispositivos Mosfet y diodo SiC son implementados con el Toolbox Simscape de Simulink. Para el diseño de los modelos es necesario colocar todos los valores de funcionamiento y rangos de trabajo de cada dispositivo, estos valores son suministrados por el fabricante a partir de hojas de datos de cada elemento.

**Tabla 2**  
**Características de dispositivos SiC**

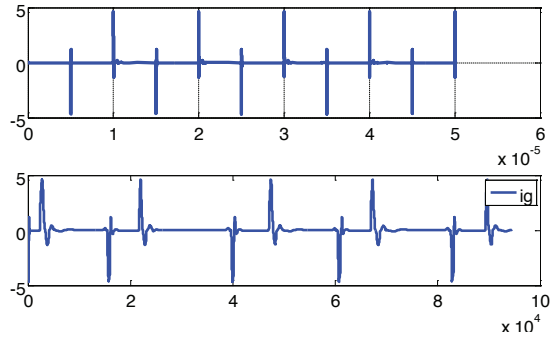
Topologías	VSI	CSI
<b>Mosfet SiC</b>	SCT3040KL	SCT3040KL
<b>Fabricante</b>	ROHM	ROHM
<b>Voltaje Max</b>	1200V	1200V
<b>Corriente Max</b>	55A	55A
<b>Rds</b>	40m $\Omega$	40m $\Omega$
<b>Encapsulado</b>	TO-247N	TO-247N
<b>Temperatura</b>	175°C	175°C
<b>Diodo Scktty SiC</b>		GB50SLT1-247
<b>Fabricante</b>		GENESIC
<b>Voltaje Max (VRRM)</b>		1200V
<b>Corriente Máxima IF</b>		50 A
<b>Encapsulado</b>		TO-247 AC

Fuente: los autores

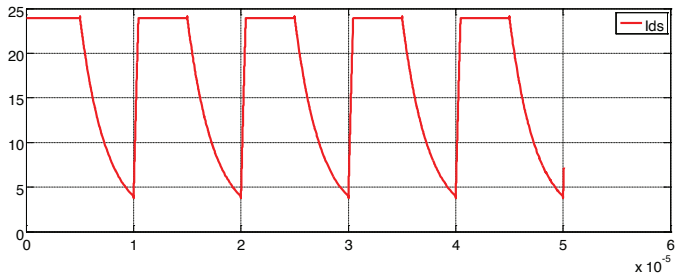
Los resultados de las simulaciones del modelo Mosfet desarrollado Simscape de Simulink se presentan en la figura 11, donde se observan las diferentes curvas de operación del dispositivo como la corriente de puerta y drenaje, voltaje de puerta y tensión de fuente de drenaje para este dispositivo.

Figura 11  
Señales de activación del modelo del Mosfet SiC

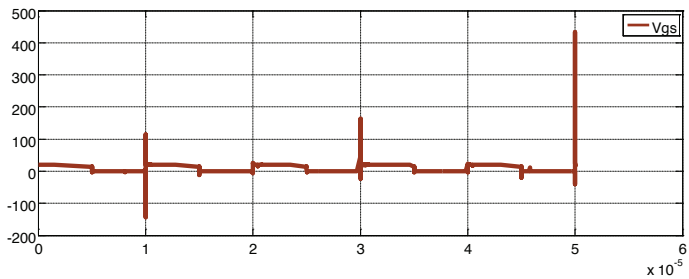
a) Corriente de puerta



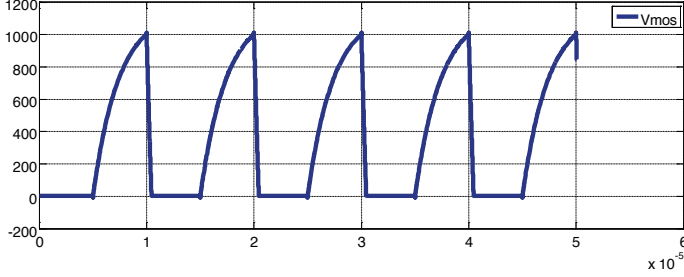
b) Corriente de drenador-fuente



c) Voltaje de puerta-fuente



## d) Voltaje drenador-fuente



Fuente: los autores

### Pérdidas de potencia

Para las pérdidas de potencia de las topologías de convertidores con dispositivos SiC propuestas, se analizan las pérdidas por conducción y activación de cada dispositivo. Es importante manifestar que el análisis de pérdidas se concentran únicamente en los convertidores trifásicos, las pérdidas en los elevadores DC/DC nos son consideradas.

Las pérdidas de potencia por conducción en la topología VSI en el Mosfet y diodo SiC pueden ser determinadas por la expresión (1) y (2), respectivamente, como lo presenta Shang (*et al.*, 2014).

Mosfet:

$$P_{CON} = (V_{CE} i_L + R_{ON} i_L^2) D \quad (1)$$

Diodo:

$$P_{CON} = (V_D i_L + R_{ON} i_L^2) (1 - D) \quad (2)$$

Donde  $i$  es la corriente máxima,  $R_{ON}$  es la resistencia de encendido,  $V_D$  es la caída de voltaje del diodo,  $D$  es el ciclo de trabajo de la modulación y  $\cos\phi$  es el factor de potencia. Las pérdidas de potencia por

activación en el Mosfet y diodo SiC se pueden calcular con las expresiones (3) y (4).

Mosfet:

$$P_{SW} = f_{SW} \cdot (E_{ON} + E_{OFF}) \frac{V \cdot I}{V_{NOM} \cdot I_{NOM}} \quad (3)$$

Diodo:

$$P_{SW} = f_{SW} \cdot E_{rr} \frac{V \cdot I}{V_{NOM} \cdot I_{NOM}} \quad (4)$$

El  $E_{ON}$  son las pérdidas de energía de encendido y  $E_{OFF}$  son las pérdidas de energía en el apagado del Mosfet SiC.

En el caso de la topología CSI y Quasi Z, para el cálculo de las pérdidas la regla importante es que siempre haya al menos un dispositivo encendido en el convertidor (Shang *et al.*, 2014). Las pérdidas de potencia por conmutación para estas topologías se pueden calcular por (5) y (6).

Mosfet:

$$P_{CON} = 2(I_{DC} \cdot V_{DS,0}) + I_{DC}^2 (R_{DS}) \quad (5)$$

Diodo:

$$P_{CON} = \frac{1}{3} (V_T I_{DC} + R_T I_{DC}^2) \quad (6)$$

$V_T$  es el voltaje de umbral  $R_T$  es la resistencia dinámica. Las pérdidas de potencia por activación en el Mosfet y diodo de SiC se pueden calcular con la expresión (7).

$$P_{SW} = \frac{6}{2} f_{sw} (E_{On,I} + E_{OFF,I} + E_{OFF,D}) \frac{V_{DC}}{i_{REF}} \frac{I_{DC}}{V_{REF}} \quad (7)$$



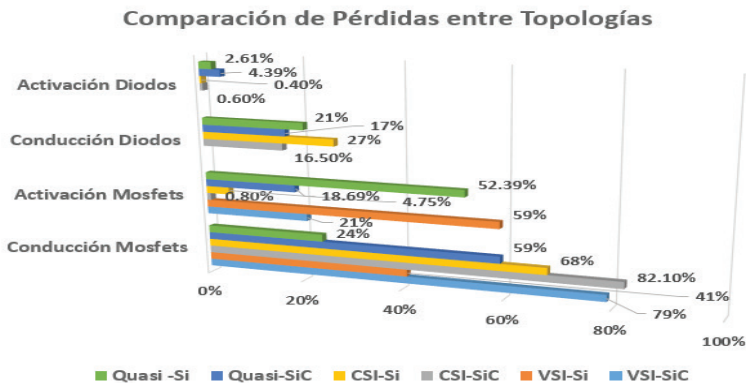
Las pérdidas de potencia por conducción y activación de las topologías analizadas con dispositivos SiC son presentadas en la tabla 3 y la figura 12. Además, se incluyen las pérdidas de las mismas topologías pero con dispositivos convencionales de silicio.

Tabla 3  
Pérdidas de potencia

Perdidas de potencia	VSI SiC	CSI SiC	Quasi Z SiC	VSI Si	CSI Si	Quasi Z Si
Conducción Mosfets SiC	288 W	360 W	260.05 W	207 W	300 W	145.68 W
Activación Mosfets SiC	75.3 W	3.3 W	82.22 W	297 W	21 W	317.02 W
Conducción Diodos SiC		72 W	78.2 W		120 W	126.6 W
Activación Diodos SiC		0.01 W	19.32 W		1.8 W	15.8 W
Pérdidas Totales	363.3 W	435.31 W	439.72 W	540 W	442.8 W	605.1 W

Fuente: los autores

Figura 12  
Comparación de pérdidas de potencia entre topologías SiC vs Si

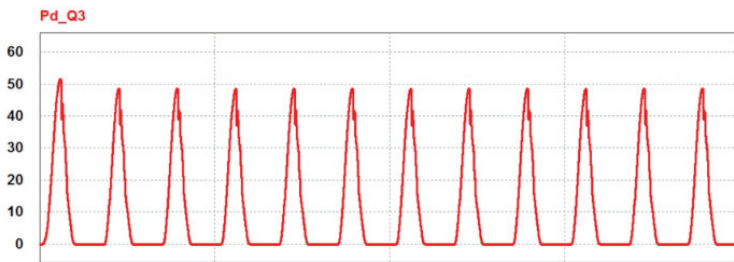


Fuente: los autores

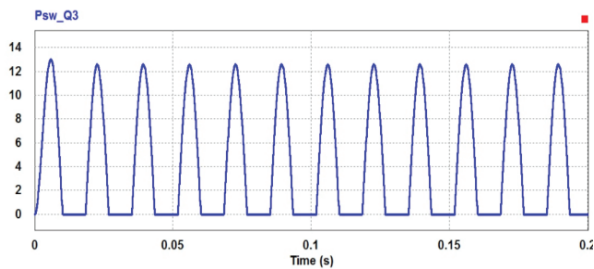
Los resultados de pérdidas por conducción y activación de las topologías analizadas en simulación son presentados en la figura 13. Los parámetros y dispositivos utilizados para este análisis son presentados en la tabla 4.

Figura 13  
Pérdidas de Potencia en VSI SiC, CSI SiC y Quasi Z SiC

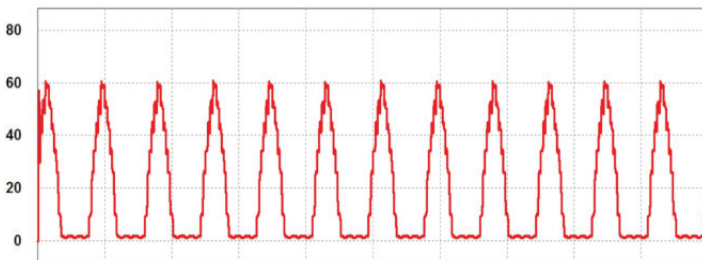
a) Pérdidas por conducción Mosfet SiC en VSI SiC



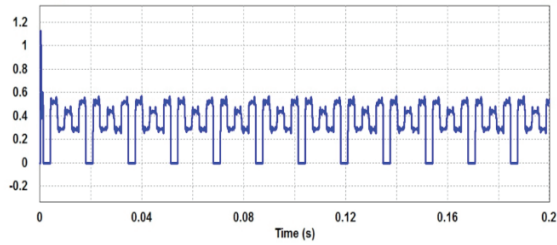
b) Pérdidas por activación Mosfet SiC en VSI SiC



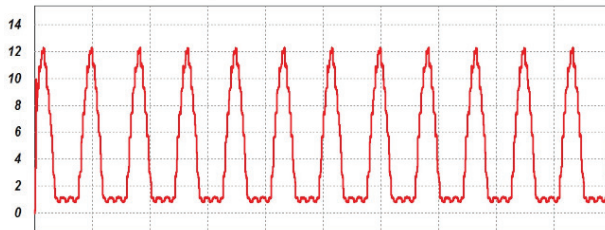
c) Pérdidas por conducción en Mosfet SiC en CSI SiC



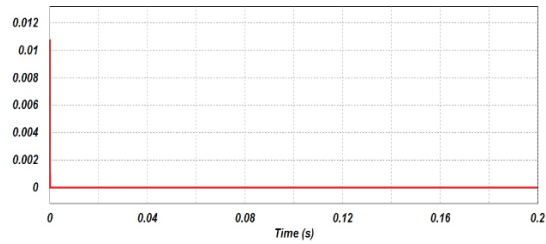
d) Pérdidas por activación en Mosfet SiC en CSI SiC



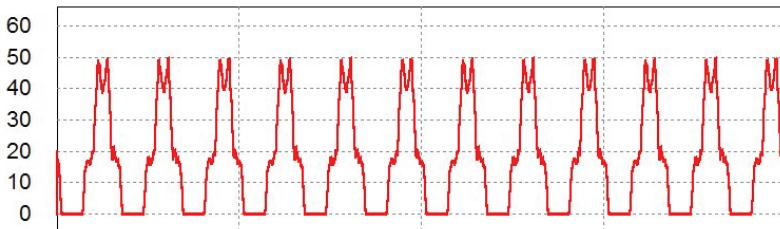
e) Pérdidas por conducción en Diodo SiC en CSI SiC



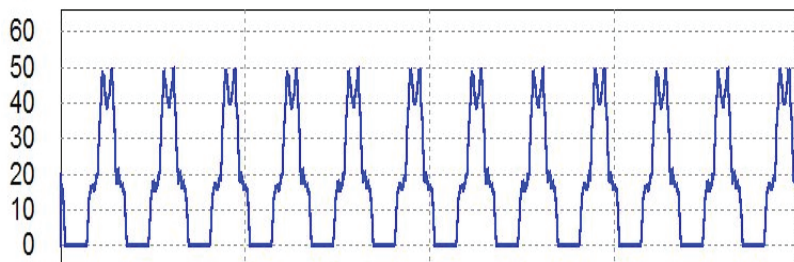
f) Pérdidas por activación en diodo SiC en CSI SiC



g) Pérdidas por conducción en Mosfet SiC en Quasi SiC



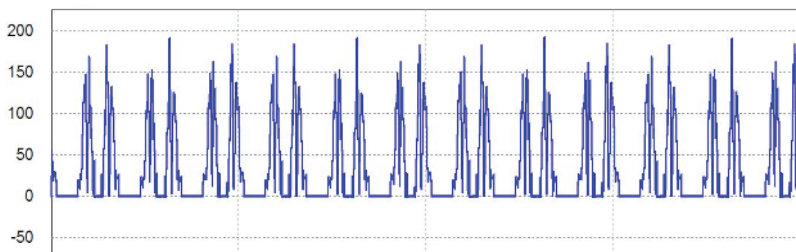
## h) Pérdidas por activación en Mosfet SiC en Quasi SiC



## i) Pérdidas por conducción en Diodo SiC en Quasi SiC



## j) Pérdidas por activación en Diodo SiC en Quasi SiC



Fuente: los autores

Tabla 4  
Parámetros de Simulación

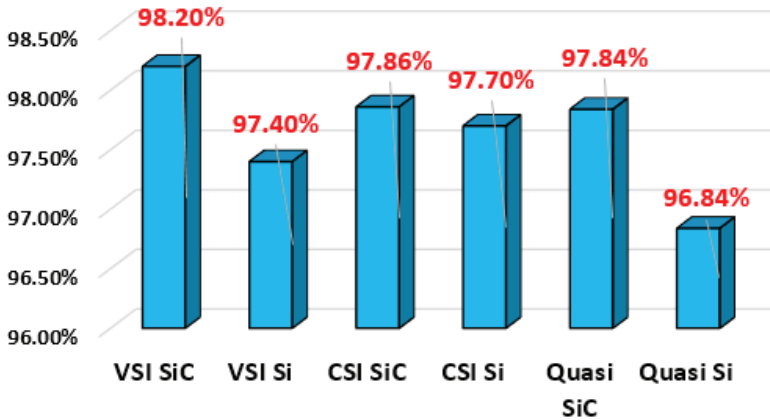
Parámetro	VSI	CSI	Quasi
Potencia	20Kw	20Kw	20Kw
Frecuencia	100 kHz	100 kHz	100 kHz f
Modulación	PWM	PWM	PWM
Dispositivos SiC Mosfet	SCT3040KL	SCT3040KL	SCT3040KL
Dispositivos Si IGBTs	IXGH40N60	IXGH40N60	IXGH40N60
Diodo Sckotty SiC		GB50SLT12-247	GB50SLT12-247
Diodo Si		ISL9R360G	ISL9R360G
Voltaje de Alimentación	300V	300V	300V
Carga	$R=3.87\Omega$ ; $L=7.7\text{mh}$	$R=3.87\Omega$ ; $L=7.7\text{mh}$	$R=3.87\Omega$ ; $L=7.7\text{mh}$
Condensadores e Inductancias			$L1=100\mu\text{H}$ , $L2=L5=100\mu\text{H}$ , $C1=C2=10\mu\text{F}$ ,

Fuente: los autores

## Análisis de eficiencia

Un análisis de eficiencia entre todas las topologías presenta una comparación entre las topologías analizadas con dispositivos SiC y se compara con las implementadas con elementos de silicio. Con este análisis se puede demostrar que con la tecnología SiC se mejora la eficiencia de las topologías, además, las pérdidas de potencias se reducen. En la figura 14 se presenta el análisis de cada topología en función de la eficiencia.

Figura 14  
Análisis de eficiencia en las topologías analizadas



Fuente: los autores

Al comparar los resultados se obtiene que la topología VSI-SiC tiene la mejor eficiencia de todas las analizadas; si se establece una comparación entre topologías se determina que la que la topología VSI con dispositivos SiC incrementa la misma con respecto a la de dispositivos convencionales de silicio (97,4% a 98,2%). De igual manera sucede con la topología CSI en donde la eficiencia por parte de la topología con dispositivos SiC es de 97,86% con respecto a la de dispositivos de silicio que es de 97,7%, existe un ligero incremento esto es debido al utilizar dos dispositivos (Mosfet y diodo) en serie y hacen que las pérdidas por conducción y activación se incrementen. Mientras que en la topología Quasi-Z SiC se incrementa de 96,84% a 97,84%.

## Discusión y conclusiones

El capítulo presenta un análisis de diferentes topologías de inversores de potencia utilizados en sistemas de tracción eléctrica y son implementados con dispositivos de SiC a alta frecuencia de conmutación.

El aporte principal es mostrar las ventajas que brindan los dispositivos SiC en topologías de convertidores para tracción eléctrica con el objetivo de mejorar la eficiencia energética dentro de los mismos, si bien el uso de estos dispositivos a nivel de fabricantes de vehículos eléctricos se encuentra en un proceso de desarrollo y pruebas muy lentas, estudios y trabajos de investigación como este permiten mostrar los beneficios de estos dispositivos y ayudar para que esta tecnología se vayan consolidando dentro de esta área de desarrollo industrial automotriz.

La mayoría de las investigaciones consultadas se concentran en el desarrollo de convertidores con elementos de silicio convencional y a bajas frecuencias de conmutación, los resultados consultados demuestran que los sistemas de tracción obtenidos presentan mayores pérdidas de potencia, están limitados a trabajar a un cierto rango de temperatura por lo que es necesario un sistema de enfriamiento lo que hace al sistema más robusto y el tamaño de los elementos pasivos se incrementan.

Por el análisis desarrollado y los resultados obtenidos se concluye que el uso de los dispositivos SiC mejoran la eficiencia, rangos de operación en temperatura y reducción de pérdidas de potencia lo que genera mucha expectativa para su implementación dentro de sistemas de tracción eléctrica.

Una de las causas para que estos dispositivos no se consoliden es el costo que resulta elevado en comparación con los elementos Si convencionales, pero en la actualidad los fabricantes han desarrollado y siguen trabajando en dispositivos SiC con menores precios y que se encuentran en el mercado con facilidad. A todo esto se suma el interés por parte de la comunidad científica para encontrar variantes de topologías con dispositivos para optimizar las ya existentes en el mercado comercial hacen creer que pueda existir un cambio progresivo por parte de los fabricantes al uso de estos dispositivos.

## Referencias bibliográficas

- Augeri, F. (2010). *Introducción al funcionamiento en vehículos eléctricos*. CISE Electronics Corp.
- Battiston, A., Martin, J. P, Miliani, E. H., Nahid-Mobarakeh, B., Pierfederici, S. y Meibody-Tabar, F. (2014). Comparison Criteria for Electric. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 467-476.
- Haizhong, Y., Yang, Y. y Emadi, A. (2012). Traction inverters in hybrid electric vehicles. Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI.
- Hak-Jun, L., Sungho, J. y Seung-Ki, S. (marzo, 2013). A Current Controller Design for Current Source Inverter-Fed AC Machine Drive System. *Transactions on Power Electronics*, 28(3), 1366, 1381.
- Jahdi, S., Alatise, O., Fisher, C., Li Ran y Mawby, P. (septiembre, 2014). An Evaluation of Silicon Carbide Unipolar Technologies for Electric Vehicle Drive- Trains. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 517-528.
- Muhsen, H., Hiller, S. y Lutz, J. (2015). *Three-phase voltage source inverter using SiC MOSFETs: Design and Optimization*. 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), pp. 1-9, Geneva.
- Rabkowski, J., Peftitsis, D. y Nee, H. P. (2012). Silicon carbide power transistors: A new era in power electronics is initiated. *Industrial Electronics Magazine*, 6(2), 17-26.
- Shang, F., Arribas, A. P. y Krishnamurthy, M. (2014). *A comprehensive evaluation of SiC devices in traction applications*. Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI.
- Siwakoti, Y. P., Fang Zheng, P., Blaabjerg, F., Poh Chiang L. y Town, G. E. (febrero, 2015). Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review. *Transactions on Power Electronics*, 30(2), 699-716.
- Toyota Motor Corporation (mayo, 2014). *High Efficiency SiC Power Semiconductor*.
- Vrtovec, R. y Trontelj, J. (2014). *SiC MOSFETs in automotive motor drive applications and integrated driver circuit*. *Microelectronics Proceedings (MIEL)*. 29th International Conference on, Belgrade.
- Wrzecionko, B., Bortis, D. y Kolar, J. W. (mayo, 2014). A 120 °C Ambient Temperature Forced Air-Cooled Normally-off SiC JFET Automotive Inverter System. *Transactions on Power Electronics*, 29(5), 2345-2358.





# Diseño e implementación de un controlador de presión de combustible en un motor Otto utilizando “realimentación de estados”

---

Juan D. Valladolid<sup>1</sup>

Galo A. Guachanamá<sup>2</sup>

Gustavo M. Domínguez<sup>3</sup>

## Resumen

El presente proyecto trata del diseño y construcción de un controlador para la bomba de combustible mediante la realimentación de los espacios de estado, a través del cual se puede controlar el ancho de pulso para la variación de las revoluciones a las que gire el motor eléctrico de la bomba, obteniéndose una mejor estabilización en un tiempo menor que con el uso de un control clásico. Mediante un estudio a los sistemas de control moderno así como, a los procedimientos experimentales para la toma de muestras en diferentes regímenes de funcionamiento del motor, se garantiza que las pruebas puedan realizarse de manera repetitiva. También se expone el procedimiento para la creación del controlador mediante la obtención de la función de transferencia, transformación a espacios de estado y creación del observador. Después se describe el funcionamiento del motor Samsung SM7 sin el controlador y con el controlador, para la toma final de muestras y su posterior análisis exponiendo la efectividad del controlador y el ahorro energético que se obtiene con el uso del mismo. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en forma de tablas, para generar conclusiones y recomendaciones del proyecto realizado.

## Palabras clave

Espacio de estado, observabilidad, controlabilidad, algoritmo.

- 
- 1 Máster en Control y Automatización Industriales, ingeniero en Electrónica e investigador del grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT) de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. Docente de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz (jvalladolid@ups.edu.ec).
  - 2 Ingeniero Mecánico Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (galoguachanama@gmail.com).
  - 3 Ingeniero Mecánico Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (wmorochod@gmail.com).

**Abstract**

*The present project deals about the design and construction of a controller for the fuel pump by means of the feedback of the state spaces, through which the pulse width can be controlled for the variation of the revolutions to which the electric motor of rotation the pump, obtaining a better stabilization in a less time than with the use of a classic control. A study of modern control systems as well as experimental procedures for sampling at different engine operating regimes ensures that tests can be performed in a repetitive manner. Also the procedure for the creation of the controller is presented by obtaining the function of transfer, transformation to state spaces and creation of the observer. Afterwards the operation of the Samsung SM7 engine without the controller and the controller is described, for the final sampling and its subsequent analysis, exposing the effectiveness of the controller and the energy saving obtained with the use of the same. Finally, the results obtained in the form of tables are presented, to generate conclusions and recommendations of the project carried out.*

**Keywords**

*State space, observability, controllability, algorithm.*

## Introducción

### Sistema de alimentación de combustible

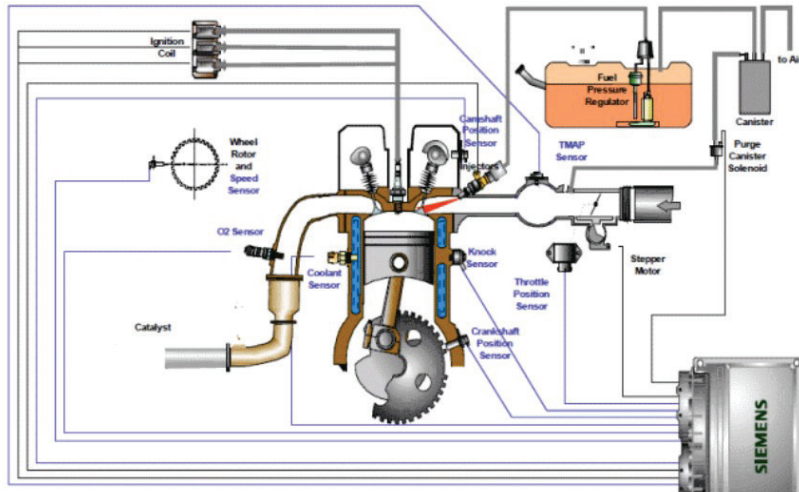
El sistema Multi-Puertos de Inyección Electrónica (MPFI) tiene como objetivos reducir el exceso de emisiones nocivas que genera el motor y regular el consumo de combustible, para ello cuenta con un inyector (controlado electrónicamente) en cada cilindro colocado lo más cerca posible de la válvula de admisión.

El funcionamiento de este sistema (figura 1) comienza en el depósito del cual es aspirado el combustible previamente filtrado con ayuda de una bomba eléctrica, ubicada en el interior del mismo depósito. Se envía el combustible a través de las líneas de alimentación al filtro, un regulador de presión presente en la línea o en el tanque es el encargado de mantener la presión constante en el sistema enviando al depósito el combustible no utilizado y finalmente llega a los inyectores en donde se dosifica, el combustible para cada cilindro.

El control principal se da mediante el sensor de oxígeno ubicado en el sistema de escape, que indica a la ECU la cantidad de oxígeno presente en los gases de salida para ajustar la mezcla y el tiempo de inyección más adecuado. La mejor mezcla para minimizar las emisiones de escape

es de 14,7 partes de aire por 1 parte de gasolina por peso, mejorando así la función del convertidor catalítico (Santiago, 2017).

Figura 1  
Sistema MPFI



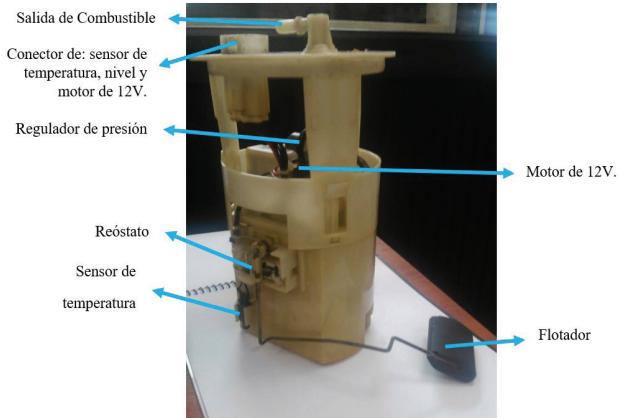
Fuente: Bosch, 2005

A continuación, centraremos el estudio en la bomba de combustible y especialmente en el motor de 12 V, el cual va a ser controlado.

## Bomba de combustible

La bomba es la encargada de suministrar combustible en todo momento desde el depósito hasta el riel de inyección para el funcionamiento del motor (figura 2). Con el objetivo de mantener la presión constante en las líneas de combustible, la bomba suministra un caudal mayor al realmente necesario, volviendo el excedente al depósito.

Figura 2  
Partes de una bomba de combustible por inmersión



Fuente: los autores

Las bombas *in tank* van montadas en el tanque y sumergidas en el combustible, el mismo que la enfría y lubrica. Cuando se activa la bomba, el motor de 12 V extrae combustible y lo envía a presión a través del orificio de salida (figura 3), en donde se encuentra una válvula *check* que mantiene la presión cuando el motor de combustión está apagado (presión residual) mejorando las características del arranque y evitando la vaporización por retorno tibio de combustible.

Figura 3  
Motor de 12 V



Fuente: los autores

La presión de combustible está determinada por el resorte en el interior del regulador y el exceso es devuelto al tanque de combustible (Santiago, 2017).

## Control moderno

### *Realimentación de estado*

La realimentación o retroalimentación es un mecanismo por medio del cual una cierta proporción de la salida de un sistema ingresa nuevamente al principio del sistema, con objetivo de controlar su comportamiento.

El espacio de estado utiliza variables de estado que pueden estar disponibles o no para la realimentación, estas se obtienen del modelo matemático de un determinado proceso. Además, se puede hacer uso de herramientas como: ayudas computacionales para realizar cálculos tediosos, polos de lazo cerrado empleados para el diseño del controlador, índices de desempeño para preparar sistemas de control óptimo, entre otros.

Tanto para el diseño de sistemas reguladores, como para el diseño de servosistemas se analiza el método de ubicación de polos de lazo cerrado, de forma que el sistema sea asintóticamente estable. Para ello, todas las variables de estado deben estar disponibles para ser realimentadas (Ogata, 2010).

Si el sistema de estado es controlable, los polos en lazo cerrado se pueden colocar en cualquier posición mediante una realimentación de estados a través de una adecuada matriz de ganancias de realimentación de estados.

Sea un sistema de control:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

Donde:

$x$  = vector de estado (vector dimensional  $n$ )

$y$  = señal de salida (escalar)

$u$  = señal de control (escalar)

$A$  = matriz de coeficientes constantes ( $n \times n$ )

$B$  = matriz de coeficientes constantes ( $n \times 1$ )

$C$  = matriz de coeficientes constantes ( $1 \times n$ )

$D$  = constante (escalar)

Señal de control:

$$U = -K * x \quad (3)$$

La señal de control de  $U$  se identifica mediante una señal de control instantáneo, tal esquema se denomina realimentación de estado. La matriz  $K$  de  $1 \times n$  se denomina “matriz de ganancia de realimentación de estado”.

### **Observador de estado**

En un proceso real no siempre estarán disponibles todas las variables de estado necesarias para ser realimentadas, motivo por el cual deben ser estimadas mediante un dispositivo o un programa de computadora llamado observador de estado. El observador de estado estima las variables de estado con base a la medición de las variables de salida y las de control. El diseño de observadores de estado se lo efectúa de forma totalmente independiente con respecto a los diseños de realimentación de estado.

El observador es un subsistema para reconstruir el vector de estado de la planta, el modelo matemático del observador es básicamente el mismo que el de la planta, salvo que incluye un término adicional que contiene el error de estimación o error de observación, es la diferencia existente entre la salida medida y la salida estimada. El error inicial es la diferencia entre el estado inicial y el estado estimado inicial, de esta forma se define el estado matemático del observador como:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (4)$$

$$x(t) = e^{(A-BK)t} x(0) \quad (5)$$

Donde:

$\tilde{X}$  = estado estimado

$C\tilde{x}$  = salida estimada

Las entradas del observador son la salida  $y$  y la entrada de control  $u$ . La matriz  $(K_e)$ , se llama matriz de ganancia del observador, es una matriz de ponderación al término de corrección que involucra la diferencia entre la salida medida  $y$  y la salida estimada  $(C\tilde{x})$ . Este término corrige de forma continua la salida del modelo y mejora el comportamiento del observador.

## Desarrollo del estudio

### Procedimiento

Las pruebas se basan en el manual mecánico del vehículo Nissan 350Z, que cuenta con el motor Samsung SM7, con el uso del manual se toman las señales y se contrastan con los valores medidos:

Figura 4  
Banco didáctico Samsung SM7 (vista frontal y superior)



Fuente: los autores



Este trabajo considera variables como el voltaje, amperaje y la presión desarrollada por la bomba, datos obtenidos por medio de elementos de medición y control.

### *Desarrollo del controlador*

Con el código de programación en Arduino y la comunicación de Matlab, se crean dos variables en las que se registra los valores medidos durante las pruebas, para usar luego la función IDENT con el fin de obtener una función de transferencia que describa el comportamiento de las señales. La función de transferencia de segundo orden obtenida por el programa se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{11.5}{(s^2 + 11.57 * s + 50.95)} \quad (6)$$

La matriz A en forma canónica Controler en su primera fila tiene todos los coeficientes del denominador con signo cambiado. Las matrices B, C, D, se muestran a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} -11.575 & -50.9500 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$C = [0 \quad 11.500];$$

$$D = [0] \quad (7)$$

La regulación de estados se planteada con un tiempo de establecimiento ( $t_s = 1$ ) y un máximo sobre impulso ( $m_p = 0.03$ ), ya que generalmente se permite a los sistemas trabajar con un ligero sobre impulso.

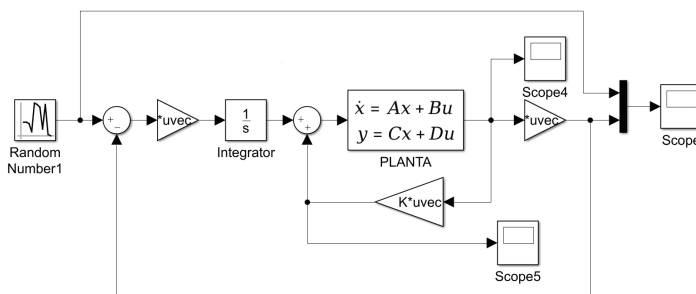
El vector  $K$  o vector de regulación de estados, usa la fórmula de Ackermann en la cual se ingresan los valores de las matrices que con-

trolan el sistema y devuelve las magnitudes necesarias de los vectores (Ogata, 2010):

$$K = [1.8005 \quad 20.8571 \quad -13.4697] \quad (8)$$

Con estos valores se realiza la construcción de la realimentación de estados mediante la herramienta Simulink:

Figura 5  
Modelo resultante realimentación de estados

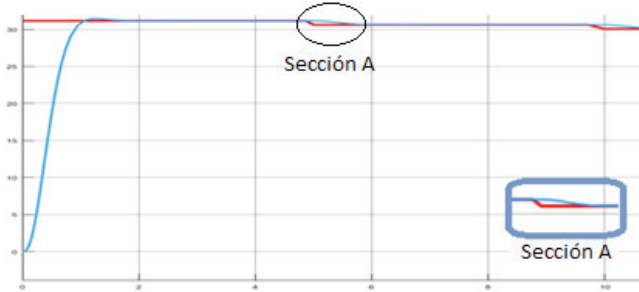


Fuente: los autores

La respuesta del sistema sigue la señal principal en el tiempo de establecimiento designado (figura 6), al sistema le toma un segundo para que se iguale la señal principal con la respuesta del sistema.

Cuando la señal principal cae existe un retardo comprensible en la señal de respuesta ya que la presión existente en la riel de inyectores y cañería tarda en consumirse aun después de que nuestra bomba deja de trabajar, al igual que cuando sube la presión esta sube más rápido manteniéndose según lo que requieran los parámetros de funcionamiento del motor de combustión.

Figura 6  
Random number vs. Realimentación de estados



Fuente: los autores

### Construcción del observador

Las ecuaciones principales que describen la planta, son las mismas que se han obtenido en forma canónica de la variable base. El observador de orden mínimo es de segundo orden:

$$G = \frac{11.5}{(s^2 + 11.57 * s + 50.95)} \quad (9)$$

La ecuación característica para el observador de orden mínimo es:

$$|sI - A_{bb} + K_e A_{ab}| = (s - u_1)(s - u_2) \quad (10)$$

A continuación, se utiliza la fórmula de Ackerman  $K_e$  y se calculan los elementos necesarios para la elaboración del observador de orden mínimo:

$$A_{bb} - K_e A_{ab} = -14.0349$$

$$B_b - K_e B_a = 1$$

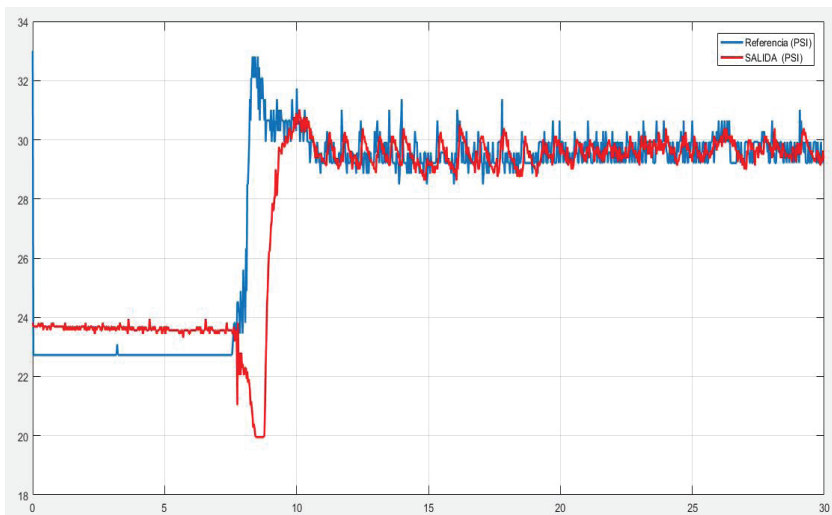
$$A_{ba} - K_e A_{aa} = -50.95 \quad (11)$$



## Análisis de resultados

La figura 8 muestra el trabajo de un controlador (PID) de color rojo, frente a la referencia medida a través del sensor de presión de color azul, con lo cual se ve que efectivamente existe un seguimiento irregular a lo largo de la prueba de arranque.

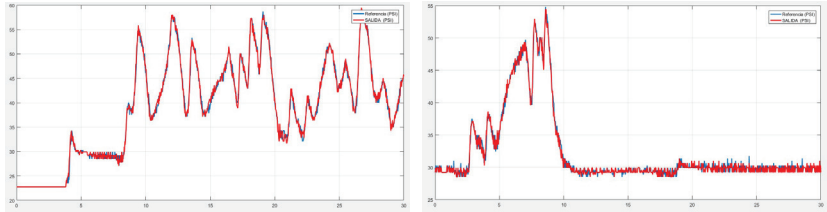
Figura 8  
Control PID: Presión censada vs. Presión de seguimiento



Fuente: los autores

La figura 9 muestra el trabajo del controlador con realimentación de estado y observador de color rojo, frente a la referencia medida a través del sensor de presión de color azul, con lo cual se observa la efectividad existe en el seguimiento inmediato por parte del control de realimentación de estados con observador adaptándose a la señal de referencia. Por lo tanto, gráficamente observamos que este tipo de controlador es más eficiente que cualquier controlador clásico.

Figura 9  
Sistema con realimentación de estado y observador



Fuente: los autores

### Calculo de intensidades y potencia

La intensidad consumida por la bomba está representada por la sumatoria de todos los datos medidos a través del osciloscopio (*fluke scope meter*). La suma de los valores es multiplicada por un elemento diferencial representado por la base de un rectángulo que al ser tan pequeño su valor es uno, dividido para el número total de datos procesados.

$$I_{sc} = \sum_{1}^{300} \frac{\text{Datos sin controlador}}{\text{numero de muestras}} * \Delta x \text{ (A)} \quad (12)$$

$$I_{sc} = 4.9781 \text{ A}$$

La intensidad consumida es de 4,97 amperios a cualquier régimen de giro del motor de combustión, porque la bomba se encuentra trabajando al 100%, todo el tiempo y envía más presión de la necesaria al sistema.

La potencia resulta de la intensidad consumida, multiplicada por el voltaje recibido. Para el cálculo se asume un voltaje de ingreso de 12 voltios.

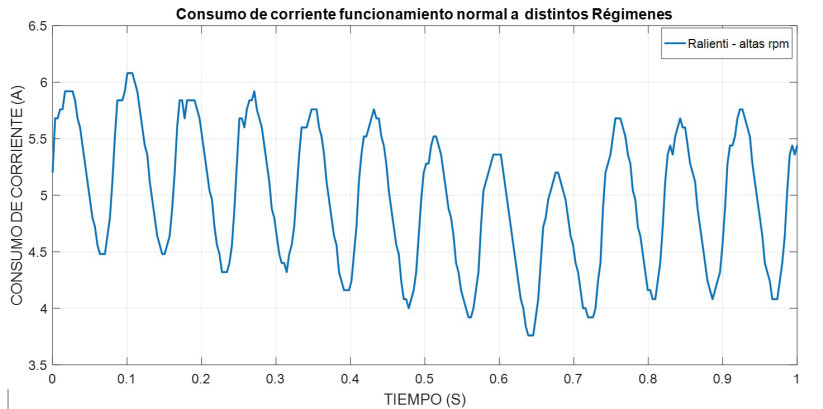
$$P = V * I$$

$$P_{sc} = \sum_{1}^{300} \frac{\text{Datos sin controlador}}{\text{numero de muestras}} * \Delta x * \text{A} * 12 \text{ V} \quad (13)$$

La potencia consumida es 59 7376 watts, por parte de la bomba.

La figura 10 presenta el consumo de corriente por la bomba de combustible cuando trabaja al 100%, el rango de amperios consumidos va desde los 3,7 hasta 6,1. Esta gráfica muestra una señal inestable con picos y descensos de corriente brusco.

Figura 10  
Funcionamiento de la bomba sin controlador



Fuente: los autores

### *Consumo de corriente sin controlador y con realimentación de estados y observador*

En la figura 11 se muestra que el consumo de corriente controlado va aumentando con las rpm del motor, y el controlador diseñado estabiliza de mejor manera la respuesta y se consume una menor cantidad de corriente incluso cuando el motor es exigido.

La señal de color azul eléctrico representa el consumo de corriente por parte de la bomba eléctrica durante el funcionamiento del motor

de combustión en ralentí, sin el uso del controlador, observamos que esta señal tiene una forma sinusoidal y el consumo de corriente fluctúa entre valores altos y bajos, además nunca se logra estabilizar a lo largo de su funcionamiento.

La señal de color gris, muestra el comportamiento del consumo de corriente en ralentí con el uso del controlador, en esta señal se observa ya una estabilización y un ciclo de trabajo que en su parte positiva o de consumo de corriente es corto y su parte negativa o de desconexión es grande en comparación con las otras graficas de consumo de corriente, esto nos brinda un ahorro del 52,21%.

A medida que aumenta las revoluciones a 1 500 rpm la gráfica de color verde muestra cómo el ciclo de trabajo en su parte positiva o de consumo de corriente aumenta y la parte negativa o de desconexión disminuye, existiendo un ahorro del 41,18%.

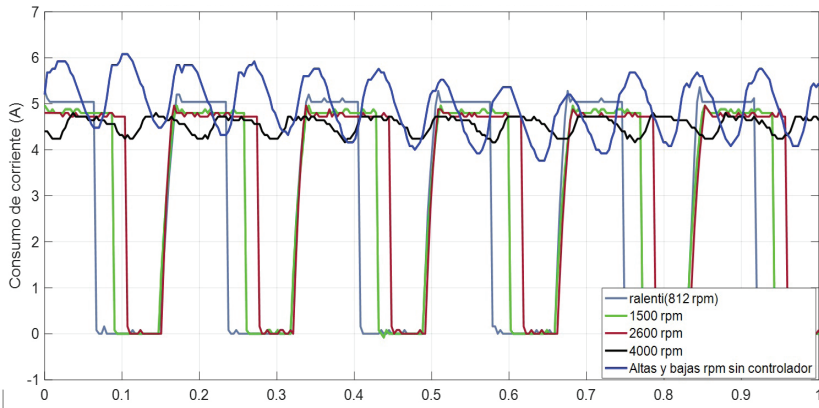
La gráfica de color rojo representa el motor a 2 600 rpm y el ciclo de trabajo en su parte de consumo de corriente aumenta mientras que la parte negativa o tiempo de desconexión sigue disminuyendo, obteniendo un ahorro de 33,23%.

Finalmente, se esfuerza al motor y obtenemos la gráfica de la señal de color negro que representa el motor a 4 000 rpm, observando que el consumo de corriente es mayor, pero se sigue obteniendo ahorro en este caso del 8,86%.

La variación del ciclo de trabajo, tanto en su parte positiva como en la parte negativa, están ligadas al aumento de las revoluciones del motor (tabla 1) y por ende exigen un mayor trabajo de la bomba de combustible, por lo que se comprende el consumo de la corriente, la señal sinusoidal de color negro tiende a ser continua ya que esta consume todo el combustible que genera la bomba.



Figura 11  
Corriente controlada vs. Corriente normal



Fuente: los autores

Tabla 1  
Eficiencia y consumo de corriente de la bomba

rpm de trabajo	Funcionamiento sin controlador		Funcionamiento con controlador		Eficiencia		
	Intensidad (A)	Potencia (W)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Intensidad ahorrada (A)	Potencia ahorrada (W)	Eficiencia (%)
Ralenti	4 978	59 738	—	—	—	—	0
Ralenti	4 978	59 738	2 379	28 547	2,599	31 190	52,212
1 500	4 978	59 738	2 928	35 133	2,050	24 605	41,188
2 600	4 978	59 738	3 323	39 882	1,655	19 856	33,239
4 000	4 978	59 738	4 537	54 442	0,411	5 296	8,865

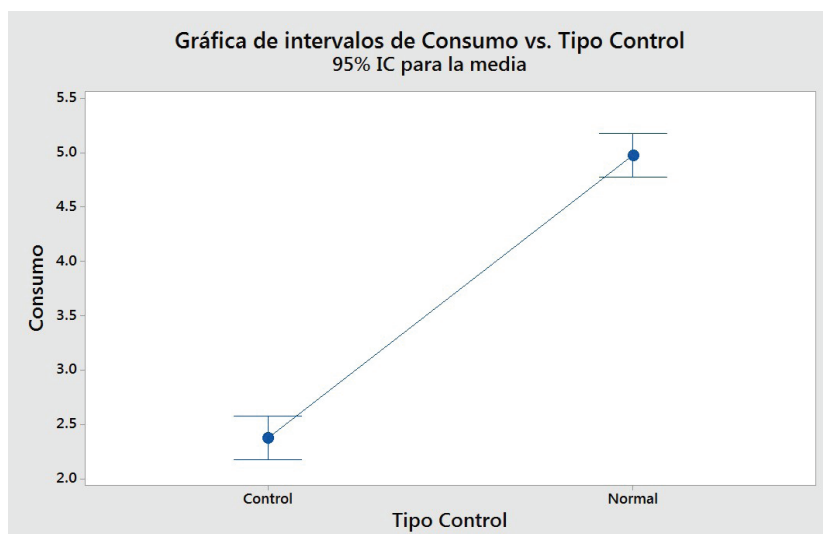
Fuente: los autores

## Análisis estadístico Anova

Con el análisis estadístico computacional podemos analizar los datos de manera gráfica. En la figura 12 se observa que el consumo de

corriente por parte de la bomba de combustible está cerca de los 5 amperios con el motor de combustión en cualquier condición de funcionamiento, mientras que cuando se usa el controlador durante el ralentí el consumo de corriente es de menos de 2,5 A, con lo que se evidencia que efectivamente existe un ahorro del 52% con respecto al funcionamiento normal de la bomba.

Figura 12  
Intervalos de consumo vs. Controlador



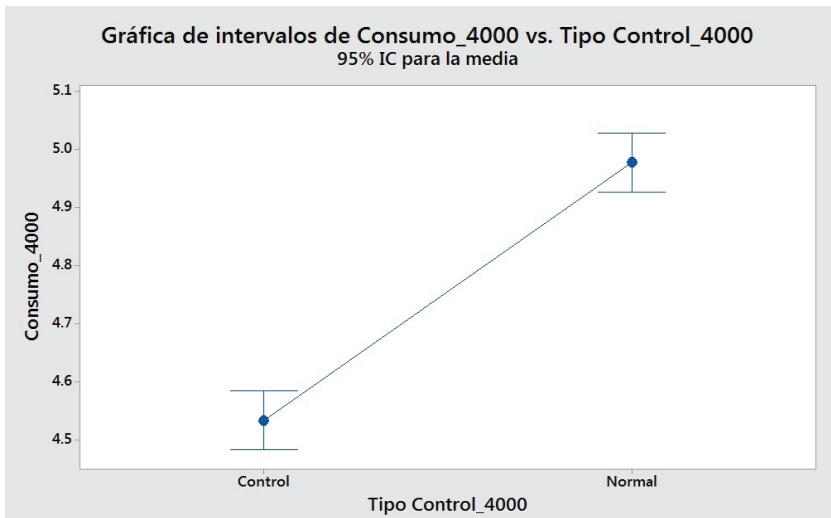
Fuente: los autores

Con la comparación de Tukey y una confianza del 95%, se observa en ralentí sin controlador un consumo de corriente de 4,97 A mientras que cuando se implementa el controlador el consumo de amperios baja a 2,37 A, lo que nos representa el 52,21% de ahorro energético durante el ralentí.

### *Análisis estadístico a 4 000 rpm*

La figura 13 presenta la corriente consumida por la bomba de combustible cuando el motor de combustión se encuentra trabajando a 4 000 rpm, en la misma se observa que el consumo de corriente por parte de la bomba de combustible está cerca de los 5 amperios, cuando se usa el controlador durante este régimen de giro la corriente es de 4 A y el ahorro logrado es del 8% aproximadamente.

Figura 13  
Consumo normal vs. Consumo controlado



Fuente: los autores

Usando la comparación de Tukey y una confianza de 95%, podemos ver que cuando el motor de combustión está trabajando a 4 000 rpm el consumo de corriente es de 4,97 A, mientras que cuando se implementa el controlador el consumo de amperios baja a de 4,53 A, lo que nos representa el 8,86% de ahorro energético durante las 4 000 rpm.

## Conclusiones

El trabajo eficiente que el controlador realiza en la bomba de combustible, permite el ahorro de corriente eléctrica y combustible, este ahorro se observará con mayor o menor intensidad dependiendo del número de revoluciones a las que se encuentre trabajando el motor. Es evidente también que el ahorro de corriente aumenta la vida útil de la batería ya que la entrega de corriente al sistema no es permanente.

La bomba de gasolina entrega valores de presión por encima de los requerimientos del motor, causando una pérdida de energía por retorno de gasolina al depósito, cuando esta es transportada de vuelta al tanque regresa a una determinada temperatura, esto produce vapores en el interior del tanque, los mismos que salen al exterior por medio de la válvula de retención de gases, evitar la recirculación del combustible hacia el depósito existe en un ahorro de energía ya que la presión generada es totalmente aprovechada por el motor. Y también evita la contaminación por gases acumulados.

Para la elaboración de una realimentación de estados y un observador, se debe tener idea del resultado que se estima, escoger un tiempo de establecimiento ( $t_s$ ), un máximo valor de sobre impulso (mp) y una velocidad de trabajo adecuada ( $W_n$ ), todos estos elementos deben estar dentro de un rango que permita a nuestra planta trabajar eficientemente evitando sobre dimensionarla.

La construcción de la realimentación de los espacios de estados, están determinadas por el correcto cálculo del vector de regulación ( $K$ ), que hace que las realimentaciones tiendan a estabilizarse más rápido, a la señal de seguimiento. Cuando se realimenta, una planta debemos cuidar que todas las unidades vectores y matrices tengan las dimensiones correctas, y sobre todo verificar los signos, ya que un error en esto último, puede generar señales de seguimiento erróneas y estados que se alejan bruscamente de la señal deseada.

## Referencias bibliográficas

- Bosch, R. (2005). Sistemas de inyección diesel por acumulador Common Rail. *Bosch*, 10(12).
- Katsuhiko, O. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Richard, C., Dorf, R. y Bishop, H. (2005). *Sistemas de control moderno*. Madrid: Pearson Educación.
- Santiago, S. (2017). *El motor de combustión interna*. Madrid: Editex
- Tamani, V. (2002). Diseño por ubicación de polos basado en modelos entrada salida. *Revistas Electrónica UNMSM*. Lima: Guillermo Tejada Muñoz.
- Zaballa, I. (2017). *El modelo de espacio de estado*. Recuperado de <http://www.ehu.eus/izaballa/Control/Apuntes/lec4.pdf>

# Metodología para la implementación de índices de mantenimiento CMD para sistemas ferroviarios

---

Renato Fierro J.<sup>1</sup>

Milton García<sup>2</sup>

Christian Torres T.<sup>3</sup>

## Resumen

En el presente estudio se establece una metodología para la implementación de índices de mantenimiento CMD (confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad) en sistemas ferroviarios, basados en las normas "EN 50126:2005" e "ISO 100 17:2013". Se realiza un proceso de recolección de información sobre la estructura y procesos de los sistemas ferroviarios actualmente operativos y relevantes en Latinoamérica. Posteriormente se describe conceptualizaciones de los índices de CMD y sus relaciones matemáticas y de distribución. Se definen los tiempos de operación y mantenimiento dentro de un proceso productivo en la industria ferroviaria, y así en base a normativa se justifica el uso de la distribución de Weibull para el cálculo de los índices, a fin de poder evaluar la gestión de mantenimiento de un sistema ferroviario genérico. Con ello se busca brindar una guía en la toma de decisiones de mantenimiento dentro de esta industria con tendencia de desarrollo.

## Palabras clave

Confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, mantenimiento, sistema ferroviario.

## Abstract

*This chapter establishes a methodology for the implementation of RAM parameters (Reliability Availability and Maintainability) for railway systems, based on the EN 50126:2005 and ISO 10017:2013 standards. A data collection is executed to gather information about the structure and processes of the most relevant and operative railway systems in Latin Americas. Then, RAM parameters concepts are described with its math and distribution relationship. Maintenance and operation time of*

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil (pfierro@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (mgarcia@ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (christian13ctjd@hotmail.com).

*productive processes based on are life inside the railway industry. In addition, on the use of Weibull distribution is justified for the standard calculation of parameters in order to evaluate the maintenance management of a generic railway system. All is done with the intention to offer guide in decision making for maintenance support for this developing industry.*

**Keywords**

*Reliability, availability, maintainability, railway systems.*

## Introducción

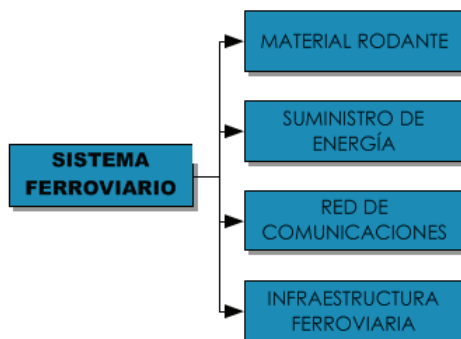
El sistema ferroviario ha sido el medio de transporte más importante de los dos últimos siglos debido a su función de integración y comunicación entre los sectores productivos, sociales y territoriales. En la actualidad continúa con su función y por ello este sistema requiere de una gestión de mantenimiento que garantice la eficiencia del servicio, para el cumplimiento de su objetivo principal de lograr un nivel definido de tráfico en un tiempo dado y de forma segura. La gestión de mantenimiento está orientada a incrementar la disponibilidad de los equipos, en una conveniente relación costo-beneficio, permitiendo que estos funcionen de forma eficiente y confiable dentro del contexto operacional establecido.

Durante la ejecución de un estudio CMD se realiza una caracterización probabilística de los procesos de deterioro que afectarán los sistemas, subsistemas y componentes asociados en un proceso productivo, a fin de pronosticar la mayoría de los escenarios de paros y fallos. Las ventajas del estudio científico y matemático de los índices CMD buscan una metodología adecuada para medirlos y evaluarlos eficazmente, teniendo como objetivo fundamental inferir de manera cuantitativa los posibles desenlaces de un evento en forma de pronósticos o predicciones.

## Caracterización de sistemas ferroviarios

Para este trabajo se realiza una caracterización general de la estructura de un sistema ferroviario, basado en el estudio de varias líneas ferroviarias operativas en Latinoamérica, con lo que se concluye la subdivisión principal mostrada en la siguiente figura:

Figura 1  
Estructura de un sistema ferroviario



Fuente: los autores

1. Material rodante. Representa los equipos y elementos que circulan a lo largo de la vía férrea.
2. Suministro de energía. Es el subsistema encargado de la recepción, transformación y distribución de la energía eléctrica proveniente de los alimentadores de la compañía suministradora, hacia los circuitos de tracción, alumbrado, fuerza y servicios propios.
3. Red de comunicaciones. Su objetivo es conseguir de manera centralizada la supervisión y gestión remota de todos los sistemas consiguiendo, al mismo tiempo, cumplir todas las exigencias aplicables a un conjunto de sistemas de control moderno.
4. Infraestructura ferroviaria. Representa, en sí, toda la infraestructura física para el funcionamiento de un sistema ferroviario, tales como: vía (y todos sus componentes), estaciones, talleres y cocheras.

### *Tiempos de funcionamiento*

Se debe establecer el tiempo de funcionamiento del sistema, este se compone de la siguiente manera:



- Tiempo de alistamiento o tiempo de puesta en marcha durante el cual, el sistema prepara todos sus elementos y componentes para prestar el servicio.
- Tiempo de producción es aquel que el sistema presta el servicio de transporte de pasajeros.

### **Codificación**

Se debe realizar una codificación de los sistemas, subsistemas y componentes ferroviarios para tener una más fácil identificación de cada uno de ellos dentro del proceso de cálculo de los índices CMD. Se propone una codificación alfanumérica, donde el código contenga dos letras (iniciales de cada subsistema) y números según los niveles que se hayan definido en cada uno. A continuación, se presenta un ejemplo del esquema propuesto:

Tabla 1  
Esquema de codificación

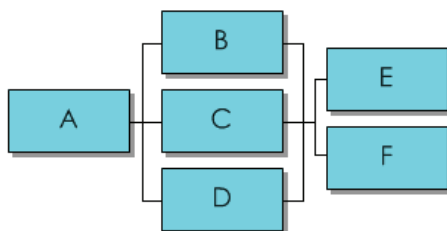
Esquema de codificación			
Subsistema	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
XX	X	X	X
IF	1	3	1
IF1313 – Sistema de cambio de vía			

Fuente: los autores

### **Determinación CMD**

Se debe determinar una equivalencia estructural de cada subsistema y poder establecer una fórmula general CMD. Así se explican las analogías algebraicas para estructuras:

Figura 2  
Estructura de sistemas



Fuente: los autores

Para continuar con la resolución de esta estructura, primero se reduce los elementos en paralelo entre sí, tales como: ( $X = A, B, C$ ), ( $Y = E, F$ ).

$$X = 1 - [(1 - B) \cdot (1 - C) \cdot (1 - D)]$$

$$Y = 1 - [(1 - E) \cdot (1 - F)]$$

Con esto se tiene una expresión en serie como la siguiente:

Figura 3  
Estructura en serie



Fuente: los autores

Llegando a la expresión final:

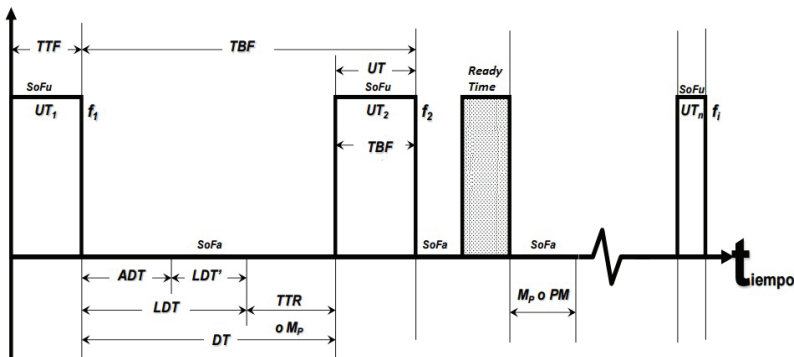
$$\text{Sistema} = A * X * Y$$

### Tiempos de mantenimiento

El punto de partida para el estudio de la fiabilidad es el funcionamiento correcto. Por tanto, el estudio trata de la dicotomía de que un dispositivo o funciona adecuadamente (SOFU) o falla (SOFA).

Un equipo recuperable durante su ciclo de vida, fluctuará entre SOFU y SOFA. Los estados del equipo durante su proceso de uso se llama “perfil de funcionalidad”. Normalmente se usa el tiempo calendario como unidad de tiempo operativo en la representación del perfil (Céspedes y Toro, 2001).

Figura 4  
Perfil de funcionalidad



Fuente: Mora, 2009

Basados en este concepto, se definen los tiempos de mantenimiento dentro de un proceso productivo:

- Tiempo hasta fallar TTF (Time to Failure): para equipos que fallan una sola vez, no reparables.
- Tiempo para reparar TTR (Time to Repair): sin incluir demoras ni tiempos logísticos, ni administrativos.
- Tiempo entre fallas TBF (Time Between Failure).
- Tiempo útil UP (Up Time): tiempo que el equipo funciona correctamente.
- Tiempo no operativo (Down Time).
- Tiempo de retrasos administrativos ADT (Administrative Delay Time): retrasos administrativos exógenos a la actividad propia de reparación.

- Tiempo de retrasos logísticos LDT' (Logistics Delay Time): retrasos logísticos para la obtención de insumos para la reparación.
- Tiempo total logístico LDT (Logistics Down Time): mantenimientos planeados PM (Planned Maintenances): preventivos o predictivos.
- Tiempo de alistamiento (Ready Time): el equipo está operando, pero no produce.

## Metodología

### *Manejo de la información*

El manejo de la información hace referencia a la recopilación, procesamiento e interpretación de los diferentes tiempos de mantenimiento, especificados anteriormente, de cada uno de los componentes del sistema ferroviario a analizar. Para el manejo de información es necesario establecer responsabilidades para cada paso.

1. Recopilación. Se realiza un recuento cronológico de fallos e intervenciones correctivas de los diferentes componentes del sistema durante el tiempo de operación del mismo. Responsable: personal de mantenimiento.
2. Procesamiento. Se compone de verificación, archivo, frecuencia de recopilación y retención de registros, de la información. Responsable: coordinador/supervisor. Posteriormente se realiza el cálculo propiamente dicho de los índices CMD como procesamiento estadístico de los tiempos.
3. Interpretación. Se realiza el análisis y la evaluación de la gestión y operación del mantenimiento mediante una interpretación conceptual del comportamiento de los índices, es decir, se observa el cumplimiento o no de las metas planteadas y según tendencia se establece acciones.

## *Justificación de uso de la distribución de Weibull*

Los fallos en los sistemas, subsistemas y componentes ferroviarios se producen de forma aleatoria, por lo que los tiempos medidos se consideran datos aleatorios continuos adaptables a la distribución de Weibull. Esta distribución de probabilidad continua provee, mediante cálculos, representaciones de comportamiento de los componentes y su ciclo de vida, gracias a la adaptabilidad y al amplio rango de sus parámetros característicos y las familias de distribuciones que cubre. Este tipo de distribución es muy flexible y se ajusta a las tres zonas de la Curva de Davies: mortalidad infantil, madurez y envejecimiento, y etapas típicas del ciclo de vida.

Según la norma ISO/TR10017:2003, las técnicas estadísticas empleadas en el análisis de confiabilidad permiten que los niveles de confianza estadísticos se adjunten a las estimaciones de los parámetros de los modelos de confiabilidad desarrollados y a las predicciones realizadas, utilizando en este caso el modelo de la distribución de Weibull.

## *Medidas CMD*

1. Confiabilidad. Es la probabilidad de que un sistema o equipo funcione correctamente durante un intervalo de tiempo específico y bajo condiciones de operación dadas (Uparela, 2013).

Función de confiabilidad para la distribución de Weibull:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Función de densidad de probabilidad de fallos para la distribución de Weibull:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} (t - \gamma)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Función de tasa de fallos para la distribución de Weibull:

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^{\beta}} \quad (6)$$

2. Mantenibilidad. Es la probabilidad de que un equipo o sistema pueda restablecer sus condiciones específicas de funcionamiento después de un fallo o avería en un tiempo determinado, realizando el mantenimiento en condiciones establecidas y utilizando procedimientos y recursos establecidos (Melo *et al.*, 2009).

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - C_m}{A_m - C_m}\right)^{B_m}} \quad (7)$$

3. Tiempo medio entre fallos (MTBF). Es el tiempo medio de funcionamiento hasta el fallo de un elemento. Es un indicador directo de la confiabilidad.

$$MTBF = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (8)$$

4. Tiempo medio de recuperación (MTTR). Es el tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos. Es un indicador directo de la mantenibilidad.

$$MTTR = A_m * \Gamma\left(1 + \frac{1}{B_m}\right) \quad (9)$$

5. Disponibilidad. Es la probabilidad de que un equipo o sistema pueda realizar su función satisfactoriamente en el momento que sea requerido y bajo condiciones dadas (Uparela, 2013).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (10)$$

### *Estimación de parámetros Weibull*

Para poder realizar el cálculo de la distribución de Weibull para cada función anteriormente descrita es necesario estimar los parámetros de la misma. Para estimar ambos parámetros se realiza el siguiente proceso:

1. Se obtienen los historiales de tiempo entre fallos y tiempo para reparación.
2. Se ordenan los ítems de tiempo (TBF o TTR) de manera ascendente de menor a mayor.
3. Se debe obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de fallo  $F(t)$  y para cada ítem de reparación  $M(t)$ ; a continuación se describen algunos métodos sencillos:
  - Método i-kaésimo o estimador no sesgado

$$F(t_i) = M(t_i) = \frac{j}{N + 1} \quad (11)$$

Donde:

$j$  = posición del dato ordenando de menor a mayor.

$N$  = número total de datos

- Método de Benard para el rango de mediana

$$F(t_i) = M(t_i) = \frac{j - 0,3}{N + 0,4} \quad (12)$$

Donde:

$j$  = posición del dato ordenando de menor a mayor.

$N$  = número total de datos

4. A partir de la ecuación (13) llegamos a una representación lineal de la función de distribución de fallos acumulados para la distribución Weibull:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (13)$$

Se expresa la representación logarítmica de la distribución de fallos acumulados:

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \quad (14)$$

Para, a continuación, expresar la representación lineal de la distribución de fallos acumulados:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \ln(t-\gamma) - \beta \ln(\eta) \quad (15)$$

Que ajustando a las escalas apropiadas toma la forma de una recta del tipo:

$$y = a * x + b \quad (16)$$

Para llegar a esta ecuación es necesario realizar una regresión lineal donde:

$$\ln(t - \gamma) = x \text{ de la regresión}$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = y \text{ de la regresión}$$

5. Al obtener la ecuación de la recta tenemos que la pendiente de la recta es el parámetro de forma  $\beta$ , y con el intercepto  $b$  se puede encontrar el parámetro de escala  $\eta$  de la siguiente forma:

$$b = -\beta \ln(\eta) \quad (17)$$

$$\eta = e^{\frac{-b}{\beta}} \quad (18)$$

Con los parámetros calculados, se puede graficar las diferentes funciones de la distribución de Weibull.



## Pruebas de ajuste de bondad

Una prueba de bondad de ajuste trata de contrastar la hipótesis nula, es decir, describe lo bien que se ajustan un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad, en general, resumen la concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica en un modelo de estudio (Martínez, 2011).

1. Contraste Kolmogorov-Smirnov. Se basa en la diferencia entre la función de distribución empírica y la función de distribución teórica (Martínez, 2011).

$$D = \max |F_t(t) - F_0(t)| \quad (19)$$

2. Anderson-Darling. Este contraste también está basado en la diferencia entre la función de distribución teórica y la función de distribución empírica (Martínez, 2011).

$$A_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(F_t(t) - F_0(t))^2}{F_0(t)(1 - F_0(t))} dF_0(t) \quad (20)$$

3. Chi Cuadrado. Se considera una prueba no paramétrica: cuanto mayor sea menos verosímil es que la hipótesis sea correcta (Mora, 2009).

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (21)$$

## Interpretación

De la interpretación y análisis de las curvas características CMD y de sus pronósticos, se desprenden las estrategias a realizar para lograr el cumplimiento de metas, objetivos, misión y visión de la empresa, a través del uso intensivo de estos instrumentos en la gestión y operación del mantenimiento. La estrategia de mantenimiento se diseña definiendo la táctica recomendada de acuerdo al análisis de las variables del estudio CMD.

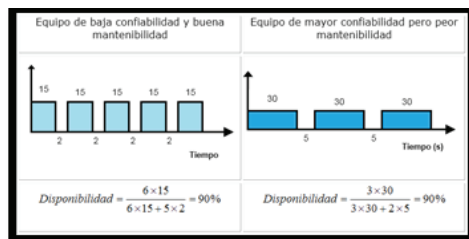
Así, cuando el sistema tiene una alta disponibilidad  $D > 95 \%$  (Merchán, 2011), este incrementa la puntualidad en el tráfico ferroviario y las decisiones se enfocan hacia el proceso de mejora continua. Por el contrario, con un sistema de baja disponibilidad las decisiones se encaminan para cumplir con las metas establecidas por la gestión de mantenimiento, con el mejoramiento de los tiempos de mantenimiento y operación (MTBF, MTTR). Además, permite el cumplimiento de requisitos de normativa EN 50126:2005 y encamina a una certificación IRIS (International Railway Industry Standard).

### *Toma de decisiones*

La obtención de los índices permitirá valorar cuantitativamente la gestión de mantenimiento aplicada y ayudará a tomar decisiones para plantearse acciones correctivas en el caso de no cumplimiento de las metas de mantenimiento, o para el proceso de mejora continua. A través de los índices de los diferentes sistemas y subsistemas se podrá identificar en cuáles se encuentran los problemas que no permiten la obtención de las metas trazadas, para efectuar sobre ellos las acciones que sean necesarias.

La disponibilidad resulta ser una función de la confiabilidad y la mantenibilidad, por lo que se debe tener en cuenta que se puede obtener la misma disponibilidad con diversas combinaciones de confiabilidad y mantenibilidad.

Figura 5  
Disponibilidad similar



Fuente: Céspedes y Toro, 2001

### *Toma de decisiones basadas en los índices en subsistemas*

Basados en los índices CMD calculados, se pueden presentar las siguientes decisiones en cuanto a acciones en los subsistemas:

- Reparaciones. Parte del mantenimiento correctivo en la que se realizan acciones manuales sobre un elemento, a través de lo cual se llega a la restauración de dicho elemento (Aenor, 2005).
- Modificaciones. Transformación de algunas características sin modificar la esencia de un elemento para que cumpla con los requisitos de funcionamiento (Murillo, 2012).
- Sustituciones. Las sustituciones o cambios propiamente dicho de piezas, elementos y/o componentes que no pudieron ser restaurados ni modificados (Murillo, 2012).

Esto, para que a través de los índices se tomen las decisiones más acertadas y así aumentar la confiabilidad de los elementos que no permiten el logro de los objetivos, con lo que se tiene un aumento de la disponibilidad en el sistema principal al que pertenecen.

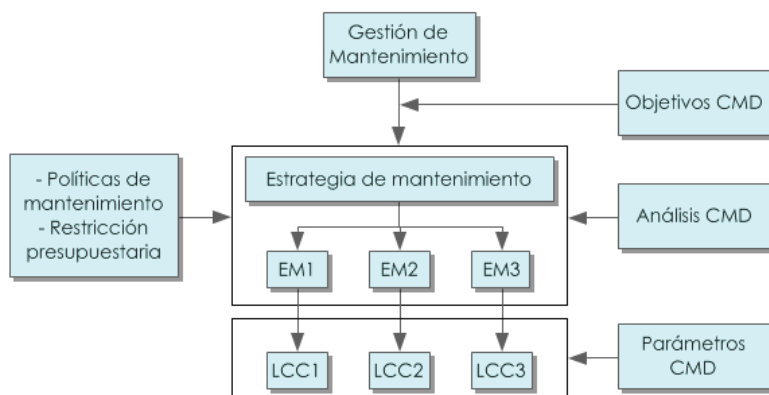
### *Toma de decisiones basadas en los índices en sistemas*

A través de los índices se tiene un enfoque cuantitativo de evaluación para la toma de decisiones en las estrategias de mantenimiento, las mismas que afectan el coste del ciclo de vida de un sistema ferroviario, que se explica en la siguiente figura:

La gestión de mantenimiento plantea los objetivos CMD que a través de la estrategia de mantenimiento aplicada trata de alcanzarlos.

La estrategia de mantenimiento se ve delimitada por las políticas de mantenimiento y las restricciones presupuestarias vigentes de la empresa, a pesar de eso, se pueden aplicar diferentes estrategias, las mismas que son analizadas por un estudio CMD.

**Figura 6**  
Coste del ciclo de vida basado en decisiones de mantenimiento



Fuente: Prasad, 2008

Con ello, cada estrategia de mantenimiento genera un coste del ciclo de vida diferente, con sus respectivos parámetros CMD a ser evaluados, para comprobar el cumplimiento de los objetivos planteados por la gestión. Cada estrategia busca el coste del ciclo de vida óptimo y el cumplimiento de los requerimientos CMD.

La estrategia de mantenimiento con el coste del ciclo de vida, que permita el cumplimiento de los objetivos, es considerada como la solución más rentable para ser implementada en las operaciones.

## Conclusiones

La estimación de índices CMD permite una evaluación cuantitativa de la gestión de mantenimiento del sistema ferroviario para el cumplimiento de metas, y planear actividades de mantenimiento basadas en análisis estadístico confiable.

La disponibilidad del sistema ferroviario es la meta última que persigue la implementación de índices CMD para alcanzar el cumpli-

miento del objetivo principal del transporte sobre vía férrea, con estándares de calidad y confort. Es decir, al tener una alta disponibilidad se garantiza la puntualidad del tráfico ferroviario sin descuidar la seguridad, esto se logrará con el cumplimiento de las RAMS.

La aplicación de índices CMD, además de evaluar la gestión de mantenimiento dentro de la organización, influye en el costo del ciclo de vida del sistema. De acuerdo al análisis de estos índices, permite aplicar diferentes estrategias de mantenimiento que son limitadas por las políticas de área y las restricciones presupuestarias aplicadas dentro de la organización.

Con la presente metodología se cumple parte de los requerimientos establecidos en la sección 6.4.3.3 de la norma EN 50126:2005, tales como: análisis y predicción de la confiabilidad, distribución de la confiabilidad, adquisición y evaluación de datos de confiabilidad, análisis y predicción de la mantenibilidad, adquisición y evaluación de datos de mantenibilidad, análisis de disponibilidad.

Para la ejecución e implementación de índices CMD podrá ser la autoridad ferroviaria reguladora quien establezca los objetivos y políticas mínimas para la evaluación de la gestión de mantenimiento del sistema.

El análisis CMD en un sistema ferroviario puede darse desde el primer día de funcionamiento de este, pero cabe recalcar que mientras más tiempo de funcionamiento tenga se tendrá mayor cantidad de datos para que las diferentes curvas puedan ser más estables y permitan pronósticos confiables.

## Referencias bibliográficas

- Aenor. (2005). *Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS)*. Madrid: UNE.
- Blanchard, B. (1995). *Ingeniería logística*. Madrid: ISDEFE.
- Céspedes, P. y Toro, J. (2001). *Metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento*. Medellín: Universidad EAFIT.

- Conradine, P. D. F (2015). Quantifying system reliability in rail transportation in an ageing fleet environment. *South African Journal of Industrial Engineering*, 26(2). Pretoria: Science Technology and Agriculture.
- Fierro, P. (2005). *Implementación de índices de mantenimiento en la Compañía Ecuatoriana del Caucho*. Cuenca: UPS-Facultad de Ingenierías.
- García, O. (2012). *Gestión moderna del mantenimiento industrial: principios fundamentales*. Bogotá: Ediciones de la U.
- González, F. (2010a). *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión: las cinco amenazas del mantenimiento*. Madrid: Fundación Confemetal.
- González, F. (2010b). *Ingeniería ferroviaria*. Madrid: Librería UNED.
- GTC - ISO. *Orientación sobre las técnicas estadísticas para la norma ISO 9001:2000. ISO/TR 10017:2003*. Bogotá: ICONTEC.
- Hernández, E. y Navarrete, E. (2001). Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento. *Ingeniería Mecánica*, 4(6). Cuba.
- Knezevic, J. (2006). *Mantenibilidad*. Madrid: ISDEFE.
- Leon, C. (2007). *Estudio de la optimización del diseño de subestaciones para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Martínez, L. (2011). *Métodos de inferencia para la distribución de Weibull: aplicación en la fiabilidad industrial*. Vigo: Universidad de Vigo.
- Melo, R., Lara, C. y Jacobo, F. (2009). Estimación de la confiabilidad – disponibilidad – mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 24(2). Monterrey: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C.
- Mora, L. (2009). *Mantenimiento: planeación, ejecución y control*. México DF: Alfaomega.
- Murillo, W. (2012). *Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos*. Chile: RCM-Ingeniería.
- Nachlas, J. (1995). *Fiabilidad*. Madrid: ISDEFE.
- Pineda, S. y Silva, L. (2008). *Implementación de los Índices CMD en los equipos rotativos de la planta de CRACKING UOP I de la GRB ECOPETROL S.A*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander-Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas-Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Merchán, J. (2011). *Pliegos de cargo de la licitación "Provisión, Instalación y Asistencia a la puesta en servicio del sistema Tranvía Cuatro Ríos de Cuenca"*. Cuenca: GAD Municipal del cantón Cuenca.

- Prasad, A. (2008). *Uncertainty in Life Cycle Cost of railway track*. Reliability and Maintainability Symposium, pp. 42-47.
- Pupo, I. (2014). *Estrategias de mantenimiento y operación en línea de trituración y apilamiento Cerro Matoso S.A. Montelíbano-Colombia, desde el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad alcanzada*. Medellín: Universidad EAFIT-Escuela de Ingeniería-Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Ribes, J. (2012). *Análisis de la evolución de la interoperabilidad y de la seguridad ferroviaria en Europa en el periodo 1991-2011 y propuesta de mejora*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya-Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Rodríguez del Águila, M. (2012). *Propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento basado en la mantenibilidad de equipos de acarreo de una empresa minera de Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte-Facultad de Ingeniería.
- Uparela, J. (2013). *Medición estratégica CMD en el sistema de vapor de una planta química en el departamento del Atlántico*. Medellín: Universidad EAFIT-Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Valero, J. (2011). *Análisis y simulación de potenciales de carril en sistemas ferroviarios de tracción en DC*. Madrid: Universidad Carlos II de Madrid-Escuela Politécnica Superior.
- Vuchic, V. (2007). *Urban Transit: Systems and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

# Obtención de la cartografía del tiempo de inyección de una ECU

Wilmer Contreras<sup>1</sup>

Carlos Andrade<sup>2</sup>

## Resumen

En la presente investigación se realiza la presentación del procedimiento aplicado para determinar la cartografía base del tiempo de inyección de una ECU (Engine Control Unit), de un motor de combustión interna de encendido provocado (MEP), el cual se basa en el estudio y simulación de los sensores y actuadores que activan su computadora automotriz. Se aplica un protocolo de adquisición de datos y su posterior análisis estadístico. Los valores estadísticos generan bases de datos que se aplican para la creación de un algoritmo que aproxima el valor del tiempo de inyección en función de los valores de los sensores de entrada y posteriormente los compara con los valores reales de la ECU. La conclusión más importante del trabajo es que la metodología propuesta para obtener la cartografía de la ECU es válida, siendo su error promedio menor de 6%.

## Palabras clave

Mapa de inyección, diagrama de ECU, TPS, MAP, CKP, CMP, tiempo de inyección, cartografía de inyección.

## Abstract

*In the present investigation the procedure is applied to determine the basic mapping of the injection time of an ECU (engine control unit), an internal combustion engine (MEP), which is based on the study simulation of sensors and actuators that activate your automotive computer. A protocol for data acquisition and subsequent statistical analysis is applied. The statistical values generate databases that are applied for the creation of an algorithm that approximates the value of the injection time in the function of the values of the input sensors and those compared with the actual values of the ECU. The most important conclusion of the paper is that the methodology proposed to obtain the mapping of the ECU is valid, with its lowest average error of 6%.*

## Keywords

*Injection map, ECU diagram, TPS, MAP, CKP, CMP, injection time, Cartography of injection.*

- 
- 1 Máster en Sistemas Automotrices, ingeniero en Mecánica Automotriz, docente de Motores de Combustión Interna de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. También es investigador integrante del GIIT (rcontreras@ups.edu.ec).
  - 2 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.



## Introducción

Desde el inicio del nuevo milenio la mayoría de fabricantes automotrices apostaron por controlar la admisión de combustible a la cámara de combustión por medio de computadoras automotrices (ECU), las cuales por su precisión y velocidad sustituyeron de forma completa a los carburadores, pero la competencia entre compañías hace que sea muy difícil encontrar los tiempos de inyección que utiliza cada uno de sus vehículos, por tanto, en el año 2008 Ernesto Gutiérrez, con su proyecto “Development of the management strategies of the ECU for an internal combustion engine: Computer simulation”, trató de simular una unidad de control para un motor de ciclo Otto con inyección electrónica de combustible. La simulación incluye un modelo para la ECU, así como los parámetros físicos del motor que permiten el control de bucle cerrado y el control de varios sistemas; además, el programa permite controlar varios parámetros de la ECU, por ejemplo: la simulación de fallos para verificar que la ECU diseñada es tolerante a fallas y puede controlar el motor al utilizar un control de bucle abierto (Gutiérrez, 2008). En la misma línea de estudio, el artículo “Use of mathematical methods of statistics for analyzing engine characteristics” de Aivaras Jasilionis (2012) presenta un breve análisis de las tendencias de desarrollo del software de control del tiempo de inyección de motores; además, presenta cómo se crean modelos de estadística matemática para la potencia del motor y el crecimiento del par motor. Los modelos que se analizan dan la oportunidad de predecir las probabilidades de potencia del motor o crecimiento del par después de la reprogramación individual del software de control del motor (Jasilionis, 2013).

En 2013, Iona Hiticas, con el proyecto “Modelling and operational testing of pulse-width modulation at injection time for a spark-ignition engine”, centró su análisis sobre las tecnologías PWM con el fin de mostrar los beneficios del control del tiempo de inyección. Al usar el PWM se pudo controlar la velocidad de referencia, posición del acelerador, así como otros parámetros y datos en las pruebas realizadas en

el vehículo Dacia Logan 1.4 MPI y evolución del tiempo de inyección (Hiticas, 2013).

En este orden de ideas, se puede citar que, con el propósito de mejorar el rendimiento de control de la fase de combustión de estado transitorio y adaptarse al cambio de la dinámica del motor, se presentó un esquema de calibración a bordo para controlar la fase de combustión de los motores de ignición por chispa (SI), proporcionando un algoritmo iterativo para actualizar el mapa de inyección (GM-Ecu, 2009). Cabe agregar que en 2014, Tamaki y Sakayanagi, desarrollaron un método para la calibración de los mapas de control, que se enfoca en utilizar como “peso” a los filtros Gaussianos, en las señales de entrada, logrando obtener mapas suavizados en condiciones ruidosas e incluso con pocos puntos medidos; la aplicación final es conseguir el avance mínimo para el mejor control de par en vehículos, dando como resultado nuevos mapas conocidos como MBT-maps (Minimum Advance for Best Torque) (Tamaki *et al.*, 2014). En este propósito, otro tipo de mapas de ignición que pueden ser utilizados para desarrollar estrategias de control en tiempo real son los obtenidos a través de las funciones de correlación no lineal de la cartografía, en donde la dispersión cíclica del combustible es la base del estudio de Wagner (*et al.*, 2001). De manera semejante, un procedimiento numérico utilizado para construir estos mapas combinó simulaciones de ciclo del motor y el modelado de los procesos de compresión, combustión y expansión, y se empleó un solucionador numérico rápido para explotar la escasez en las ecuaciones del modelo PSR (Perfectly Stirred Reactor) (Yelvington *et al.*, 2010); en relación con este último, una innovadora instalación experimental desarrollada para el Prototipado de Control Rápido (RCP), tanto para la vía de aire como de combustible mediante la tecnología FPGA (Field Programmable Gate Array), sustituyó a la unidad de control del motor (ECU), para lo cual se ha reescrito en LabView Real-Time (RT) para emular la función ECU original de un sistema de inyección de 6 cilindros (Winward *et al.*, 2010).

En general, los trabajos descritos explican la importancia de determinar el tiempo de inyección en función de diferentes parámetros, por lo que, mediante el presente trabajo, se establece una metodología para extraer el mapa cartográfico de inyección de combustible.

**Materiales y métodos**

En la presente sección se describen brevemente los materiales y equipos necesarios para la realización de la simulación de los sensores, actuadores de la ECU y los equipos necesarios para la medición de los tiempos de inyección, los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1  
Características de los equipos

Material	Imagen	Características
Fuente regulable		# de canales: 1 Max. Voltaje: 30V Max. Amp.: 2 A. Tipo de indicador: LED
Multímetro		Voltaje CC: 2000mV-1000V Voltaje CA: 2000mV-750V Corriente CC: 20mA-20A Corriente CA: 20mA-20A Resistencia: 200Ω-200MΩ
Osciloscopio		Ancho de banda: 150Hz Velocidad de muestreo: 1GSa/s Funciones matemáticas
ECU		ECU LUV 2.2 LE 12v

Kit de conexión		3 metros de cable multipar Fusible 500 mA 12 Resistencias $1K\Omega$ Resistencia $390\Omega$ Protoboard 13 Leds 5 Potenciómetros de $10K\Omega$ Capacitor Potenciómetro $50K\Omega$
Scanner		Comunicación con protocolos: OBDII, KWP, CAN BUS, SAE-J1587. Memoria 256 MB. Cobertura de vehículos entre los años: 1996-2010. Visualización de flujo de datos. Posibilidad de graficar los valores de flujo de datos. Prueba de actuadores y generación de señales de salida.

Fuente: Los autores

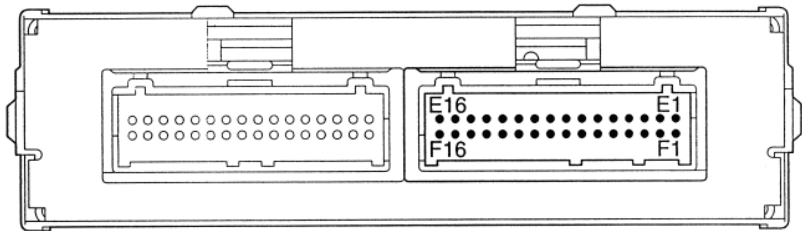
## Conectividad de los equipos de simulación

A continuación, se presenta la descripción de las conexiones del equipo experimental de simulación: diagramación de conexión de la ECU, conexión de simulación de los sensores, conexión de los actuadores y los parámetros de activación de la ECU, que son necesarios para la obtención de la cartografía de inyección.

### *Diagramación de conexión de la ECU*

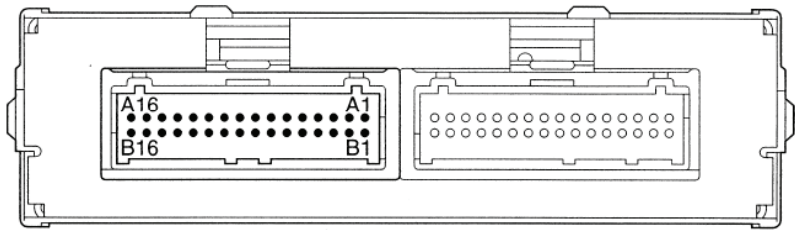
Se toma en consideración como objetivo principal realizar la conexión y activación de la ECU, para lo cual se procede a verificar la ficha técnica, esta debe ser obtenida del manual de un vehículo el cual aplica la computadora de experimentación. Posteriormente, se muestran en las figuras 1 y 2 la identificación de los pines y en la tabla 2, el listado de los pines de conexión para la activación de la ECU.

Figura 1  
Ubicación de los pines E-F



Fuente: los autores

Figura 2  
Ubicación de lo pines A-B



Fuente: los autores

Tabla 2  
Identificación de pines de conexión sección E-F-A-B

Pin	Función
E1	Positivo de la bobina A
E2	Tierra de la bobina A
E3	Tierra de la bobina B
E4	Positivo de la bobina B
E5	Sensor de posición del cigüeñal
E7	VSS
E8	Serial Data

Pin	Función
E16	Alimentación de encendido
F1	Sensor de posición del cigüeñal
F10	IAT
F12	Calentador sensor O2
F14	ECT
F15	Calentador sensor O2
A1	Tierra de alimentación A
A2	Sensor de tierra B
A3	Señal de referencia de 5V
A4	Alimentación de la batería
A5	Batería
A6	Inyector 4
A7	Inyector 1
A8	Inyector 3
A9	Inyector 2
A13	Bomba de combustible
B1	TPS señal A
B2	TPS señal B
B4	Check Engine
B5	Señal del tacómetro
B7	MAP
B8	Sensor de posición del acelerador
B11	DLC
B13	IAC B, alta
B14	IAC B, baja
B15	IAC A, baja
B16	IAC A, alta

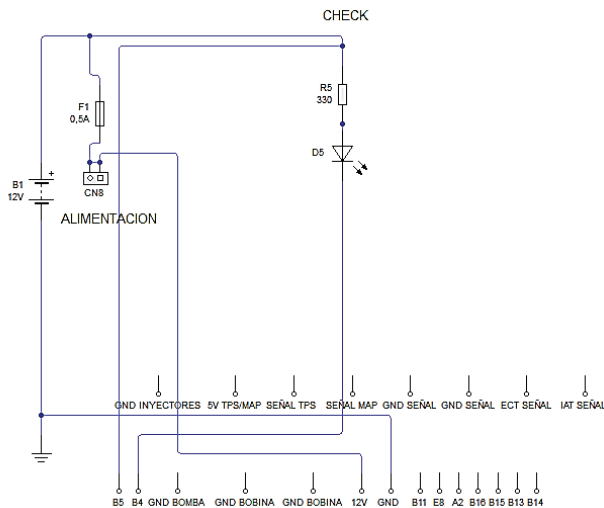
Fuente: los autores

## Conexión para la simulación de sensores

### Conexión luz de aviso

Para comenzar con el conexionado de la ECU, se deben tomar en cuenta los datos que se muestran en la tabla 2 de identificación de pines, es necesario conectar todas las alimentaciones de +12V y todas las masas, y finalmente se conecta el pin correspondiente al Check Engine, como lo indica la siguiente figura:

Figura 3  
Esquema de conexión para la luz de aviso

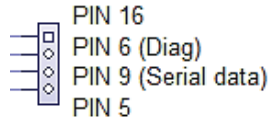


Fuente: los autores

### Conexión al scanner

Consecuentemente, se debe identificar los pines: A2, B11 y E8 para la conexión del scanner. Estos se enlazan con los pines: 5, 6 y 9 del conector del scanner respectivamente. El pin 16 del conector se envía directamente a la fuente, lo que se observa en la siguiente figura:

Figura 4  
Pines de conexión hacia el scanner

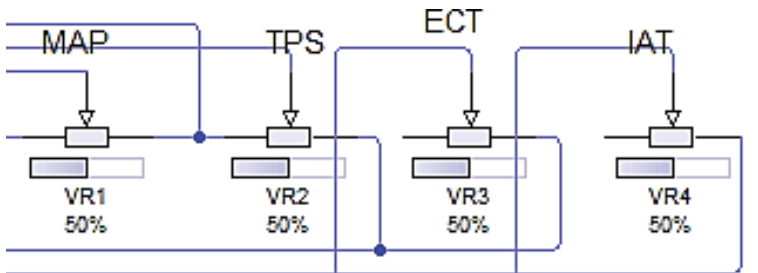


Fuente: los autores

#### *Conexión de los sensores: MAP, TPS, IAT, ECT*

Para la simulación de los sensores, se conecta un potenciómetro de  $10\text{k}\Omega$  para el MAP y TPS; y de  $50\text{k}\Omega$  para el ECT e IAT, con los cuales se simulan las señales, basándose en los pines que muestran la tabla 2 se procede a conectar los sensores (figura 5).

Figura 5  
Esquema conexión sensores MAP, TPS, IAT y ECT



Fuente: los autores

#### *Conexión sensor VSS*

La simulación de la señal del sensor VSS está compuesta por un circuito integrado 555, el cual se encarga de variar la frecuencia de los pulsos, con lo que la ECU será capaz de interpretar estas pulsaciones como variaciones en la velocidad del vehículo. En la figura 6 se muestra el esquema de conexión del VSS.

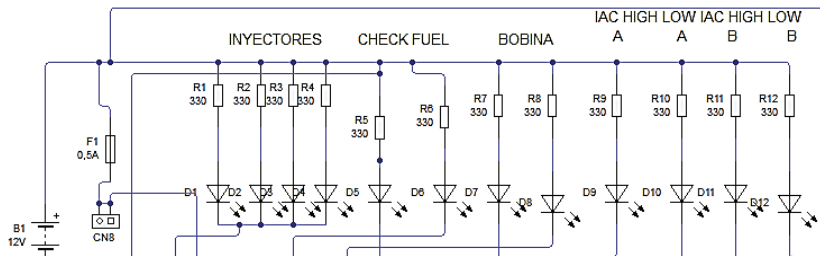




### *Conexión para la simulación de actuadores: bobinas, inyectores, IAC, relé de bomba*

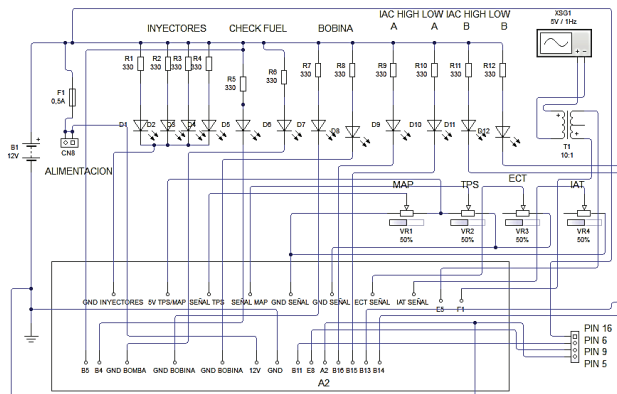
Para la conexión de bobinas, inyectores, IAC y relé de la bomba de combustible, se debe observar la tabla 2, la cual muestra los diferentes pines a los que se conectan los actuadores (figuras 8 y 9).

**Figura 8**  
Esquema de conexión de los actuadores



Fuente: los autores

**Figura 9**  
Diagrama de conexión de la ECU



Fuente: los autores

### *Proceso experimental*

A fin de obtener la cartografía del tiempo de inyección, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Conectar la computadora con el scanner automotriz.
2. Colocar los puntales del osciloscopio en la entrada y salida de la señal del inyector.
3. Escoger un sensor para variar con los diferentes rangos de rpm que se le envíe desde un software.
4. Mantener la señal de los sensores sobrantes con valores estables.
5. Variar el sensor seleccionado por medio de su respectivo potenciómetro.
6. Anotar el valor descrito por la señal mostrada en el osciloscopio.

#### *Mapas de inyección al variar la señal del sensor MAP*

Al aplicar la configuración de datos mostrada en la tabla 3, se procede a la toma de los tiempos de inyección con el osciloscopio, para lo que se utilizó un rango de 35 a 85 kPa, con un intervalo de 5 kPa, para el MAP y un rango de 850 a 5000 rpm con un intervalo de 500 rpm.

Tabla 3  
Parámetros base para toma de datos

Nombre	Valor	Unidad
ECT	85	° C
TPS	10	%
IAT	26	° C
Baro	85	kPa

Fuente: los autores

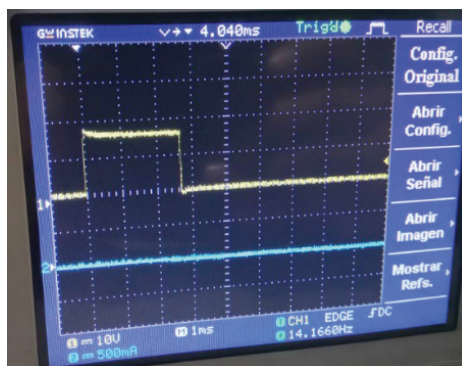
Tabla 4  
Tiempo de inyección del MAP (ms)

rpm	Tiempo de inyección (ms)											
5 000	3,39	3,94	4,67	5,3	6,02	6,69	7,3	7,9	8,4	8,9	9,35	
4 500	3,59	4,34	5,07	5,9	6,47	7,15	7,82	8,3	8,75	9,25	9,82	
4 000	3,79	4,4	5,19	5,9	6,6	7,25	7,86	8,4	8,98	9,45	9,89	
3 500	3,53	4,28	4,98	5,7	6,38	6,99	7,67	8,1	8,61	9,25	9,71	
3 000	3,44	3,95	4,69	5,4	6	6,7	7,25	7,9	8,37	8,98	9,45	
2 500	3,53	4,15	4,78	5,5	6,05	6,76	7,39	8	8,46	8,99	9,42	
2 000	3,39	3,95	4,46	5,1	5,7	6,35	6,95	7,6	8,17	8,63	9,15	
1 500	3,28	3,88	4,38	5	5,51	6,11	6,78	7,3	7,89	8,49	8,99	
1 000	2,7	3,13	3,57	4	4,4	4,93	5,19	5,5	6,37	6,99	7,01	
850	2,53	2,95	3,41	3,8	4,2	4,57	5,01	5,6	6,25	6,32	6,73	
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
	kPa (MAP)											

Fuente: los autores

Para obtener los valores que se observan en la tabla 4, se utiliza el osciloscopio como se muestra en la siguiente figura:

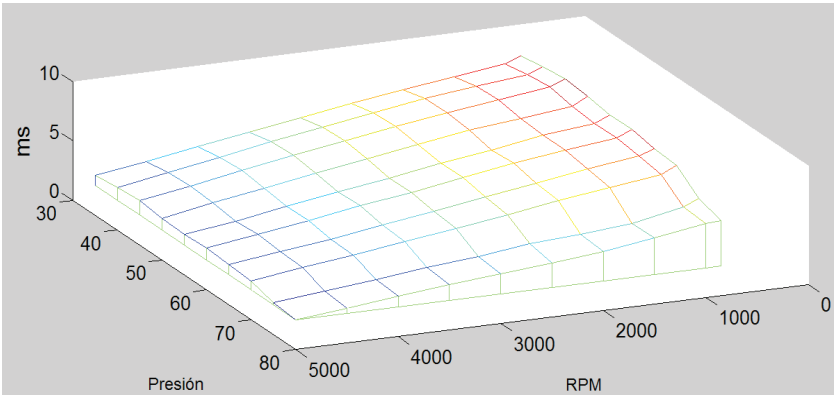
Figura 10  
Tiempo de inyección del MAP en el osciloscopio



Fuente: los autores

Luego de ello, se procede a ingresar los tiempos de inyección del MAP a un software gráfico, con el que se obtuvo la siguiente gráfica.

Figura 11  
Mapa de inyección del sensor MAP graficada en Matlab



Fuente: los autores

*Mapa de inyección del TPS*

Con la configuración de datos mostrada en la tabla 5, se realiza la toma de los tiempos de inyección con el osciloscopio, para lo que se utilizó un rango del 10% para el TPS y un rango de 500 hasta un máximo de 5 000 rpm.

Tabla 5  
Parámetros base para toma de datos

Nombre	Valor	Unidad
ECT	83	° C
MAP	35	kPa
IAT	25	° C
Baro	85	kPa

Fuente: los autores

Tabla 6  
Tiempos de inyección del TPS (ms)

rpm	Tiempo de inyección (ms)									
5 000	3,53	3,53	3,53	3,53	3,92	4,35	4,44	4,5	4,66	4,66
4 500	3,63	3,63	3,63	3,63	4,08	4,54	4,66	4,69	4,84	4,87
4 000	3,89	3,89	3,89	3,89	4,02	4,6	4,66	4,78	4,84	4,84
3 500	3,68	3,68	3,68	3,38	3,74	4,41	4,54	4,66	4,72	4,72
3 000	3,53	3,53	3,53	3,53	3,62	4,08	4,38	4,57	4,66	4,66
2 500	3,63	3,63	3,63	3,63	3,66	4,18	4,18	4,64	4,7	4,7
2 000	3,48	3,48	3,48	3,48	3,51	4,03	4,12	4,34	4,73	4,79
1 500	2,95	2,95	2,95	3,44	3,5	3,65	3,65	3,62	4,05	4,05
1 000	2,63	2,63	2,63	2,63	2,66	3,08	3,08	3,08	3,41	3,41
850	2,53	2,53	2,53	2,53	2,72	2,99	2,99	2,99	3,34	3,36
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
	TPS (%)									

Fuente: los autores

La obtención de los valores de la tabla 6, se realizan por medio de un osciloscopio, como se muestra en la figura siguiente:

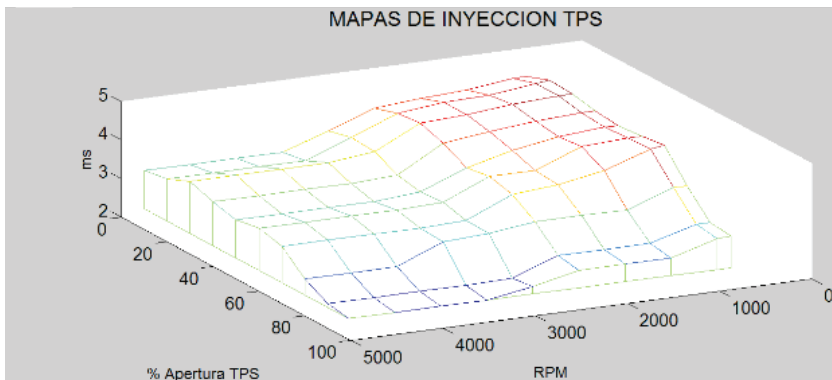
Figura 12  
Tiempo de inyección del TPS en el osciloscopio



Fuente: los autores

Después de obtener los datos, se puede generar el mapa de la cartografía, para el cual se necesita un software gráfico, con este se obtuvo la siguiente gráfica.

Figura 13  
Mapa de inyección del TPS graficada en Matlab



Fuente: los autores

### *Mapas de inyección del ECT*

Con los datos que se muestran en la tabla 7, se procede a la toma de los tiempos de inyección con el osciloscopio, para lo que se utilizó un rango del 10° C para el ECT y un rango de 500 rpm.

Tabla 7  
Parámetros base para la toma de datos

Nombre	Valor	Unidad
MAP	35	kPa
TPS	10	%
IAT	25	° C
Baro	85	kPa

Fuente: los autores

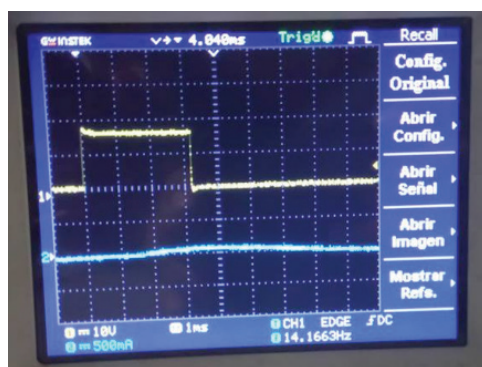
Tabla 8  
Tiempos de inyección del ECT (ms)

rpm	Tiempo de inyección (ms)											
5 000	4	4	4,2	3,4	3,6	3,75	4,1	4	4	3,9	3,85	
4 500	4,2	4,1	3,8	4,1	4,45	4,4	4,35	4,25	4,2	4,1	4,1	
4000	4,15	4,1	3,8	4,55	4,5	4,5	4,45	4,35	4,5	4,1	4,1	
3 500	4,25	3,4	3,2	3,5	3,8	3,65	4,25	4,2	4,1	4,1	4	
3 000	3,95	3,8	3,7	3,4	4,2	4,15	4	4	3,95	3,9	3,9	
2 500	4,1	3,9	4	3,8	4,5	3,2	4,2	4,15	4,1	4	4	
2 000	3,9	3,75	3,45	3,75	4,15	4,1	4	4	3,9	3,9	3,75	
1 500	3,4	3,25	3,1	3,8	3,7	3,6	4	4	3,8	3,8	3,75	
1 000	3,3	3,1	3,5	3,95	3,65	3,35	3,25	3,2	3,15	3,1	2,5	
850	3,2	3	2,8	3,75	3,2	3,2	2,6	2,5	3	3	3	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
	° C (ECT)											

Fuente: los autores

Para obtener los valores de la tabla 8, se utiliza un osciloscopio como se muestra en la figura siguiente:

Figura 14  
Tiempo de inyección del ECT en el osciloscopio

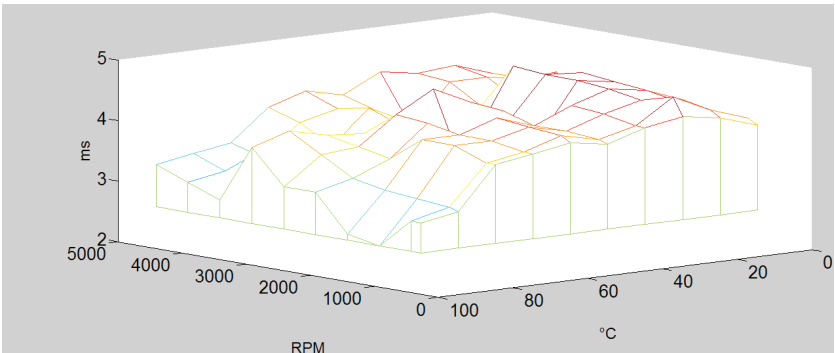


Fuente: los autores



Una vez que se obtienen los valores del tiempo de inyección se procede a graficar mediante un software gráfico, con el que se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 15  
Mapa de inyección del ECT graficada en Matlab



Fuente: los autores

*Mapas de inyección del IAT*

En el siguiente punto se debe aplicar la configuración que se muestra en la tabla 9, para esto, se procede a la toma de los tiempos de inyección con el osciloscopio, para lo que se utilizó un rango del 5° C para el ECT y un rango de 500 rpm.

Tabla 9  
Parámetros base para la toma de datos

Nombre	Valor	Unidad
MAP	35	kPa
TPS	10	%
ECT	88	° C
Baro	85	kPa

Fuente: los autores

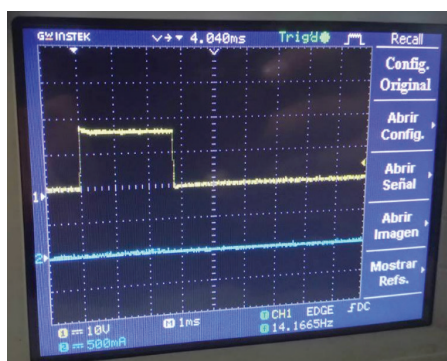
Tabla 10  
Tiempos de inyección del IAT (ms)

rpm	Tiempo de inyección (ms)										
5 000	4,00	4,00	3,95	3,91	3,80	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90
4 500	4,25	4,30	4,25	4,30	4,25	4,10	4,15	4,10	4,10	4,10	4,05
4 000	4,15	4,20	4,15	4,20	4,15	4,00	4,10	4,10	4,20	4,10	4,05
3 500	4,15	4,20	4,15	4,20	4,15	4,30	4,10	4,00	4,00	3,90	3,90
3 000	3,95	3,95	3,90	3,95	3,90	3,80	3,85	3,80	3,85	3,75	3,75
2 500	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,00	4,00	4,00	4,00	3,90	3,90
2 000	3,90	3,90	3,90	3,90	3,80	3,75	3,85	3,80	3,85	3,75	3,50
1 500	3,60	3,80	3,80	3,90	3,75	3,85	3,85	3,70	3,70	3,70	3,75
1 000	3,20	3,20	3,05	3,15	3,05	2,60	3,00	2,90	2,80	3,00	2,40
850	3,00	3,05	3,05	3,00	2,80	2,80	3,05	2,70	2,60	2,05	3,20
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	° C (IAT)										

Fuente: los autores

Para la toma de los valores descritos en la tabla 10, se utiliza el apoyo del osciloscopio como se muestra en la siguiente figura:

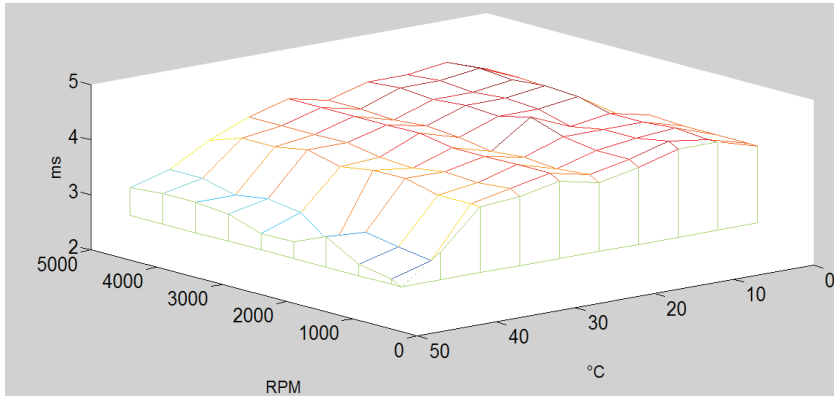
Figura 16  
Tiempo de inyección del IAT en el osciloscopio



Fuente: los autores

A continuación, se procede a ingresar en un software con el que se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 17  
Mapa de inyección de la IAT graficada en Matlab



Fuente: los autores

### *Creación de la matriz general para obtener los resultados de relación*

Con los valores descritos en las tablas 4, 6, 8 y 10 se crea una matriz para usarla en el software estadístico Minitab. Los valores que se pueden observar en la tabla 11 son un extracto de dichas tablas.

Tabla 11  
Matriz de relación entre el tiempo de inyección  
vs. Los parámetros de los sensores

ECT (°C)	MAP (kPa)	TPS (%)	IAT (°C)	rpm	T. Iny (ms)
83	35	20	25	4 500	3,63
83	35	40	25	3 500	3,68
83	35	60	25	2 500	3,92
83	35	80	25	1 500	3,62

ECT (°C)	MAP (kPa)	TPS (%)	IAT (°C)	rpm	T. Iny (ms)
83	35	100	25	850	3,36
20	35	10	25	4 000	3,8
40	35	10	25	3 000	3,65
60	35	10	25	2 000	3,35
80	35	10	25	850	3
100	35	10	25	4 500	4,1
83	35	10	0	5 000	4,00
83	35	10	10	4 000	4,15
83	35	10	20	3 000	3,90
83	35	10	30	2 000	3,45
83	35	10	50	5 000	3,90
83	40	10	25	4 500	4,34
83	50	10	25	3 500	5,67
83	60	10	25	2 500	6,76
83	70	10	25	1 500	7,34
83	80	10	25	850	8,2

Fuente: los autores

Con los valores de tiempo de inyección y el software estadístico Minitab, se aproximan estos valores por el método de regresión lineal multivariable, a una ecuación matemática que se asemeja a la cartografía de la ECU:

$$T_{iny} = -0,846 - 0,00149 * ECT + 0,112 * MAP + 0,00618 * TPS - 0,00731 * IAT + 0,000306 * RPM \quad (ec. 1)$$

## Resultados y discusión

Los valores que se obtienen mediante la simulación con la ecuación y los parámetros de entrada, se comparan con los datos que se tienen de la ECU.

Tabla 12  
Comparación entre los tiempos de inyección  
y los tiempos de la simulación

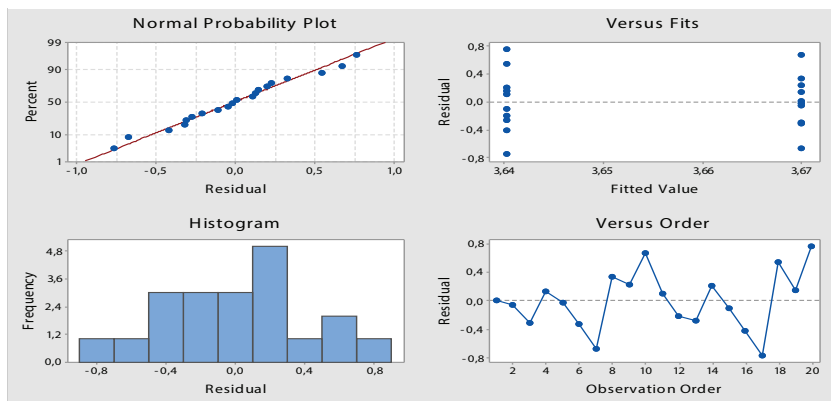
T. Iny ECU	T. Iny Cal	% de error
3,68	3,749	1,87
3,62	3,429	5,27
3,36	3,3635	0,10
3,8	3,845	1,18
3,65	3,535	3,15
3,35	3,225	3,73
3	2,8745	4,18
4	4,189	4,72
3,9	3,789	2,84
4,34	4,404	1,47

Fuente: los autores

En la tabla 12 se puede observar que los porcentajes de error no sobrepasan el 6%, por lo que se puede decir que la ecuación matemática se asemeja en gran medida a los valores que se obtienen por medio del osciloscopio.

En la figura 18 se muestra el ANOVA de los resultados obtenidos de la ecuación (1), en el cual se puede identificar que la normalidad tiene un comportamiento lineal, los valores del residuo no tienen formas de patrones con acumulación de puntos, por lo que se valida el supuesto de varianza constante y además, en la gráfica de orden, los puntos no muestran regiones de acumulación, sino más bien que fluctúan alrededor de la línea de cero. Esto implica que la toma de datos y la metodología son correctas.

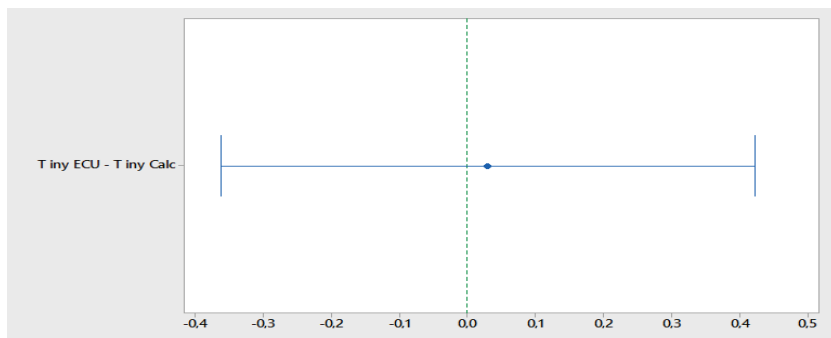
Figura 18  
ANOVA entre el tiempo inyección real  
vs. Tiempo de inyección calculado



Fuente: los autores

Para validar los valores de los resultados de la ecuación (1) se aplica un análisis de comparación por el método de Tukey, el cual evidencia que los valores de las medias están cercanos a la línea de cero, como se puede observar en la figura siguiente:

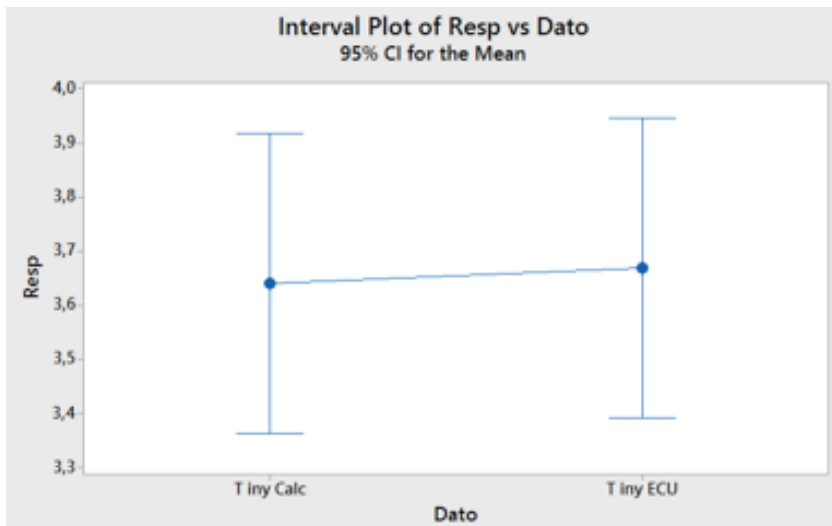
Figura 19  
Comparación de resultados por el método Tukey



Fuente: los autores

En la figura 20 se muestra que las medias del tiempo de inyección tanto de la ecuación (1) como de los datos extraídos de la ECU comparten un valor aproximado, además, se observa claramente que como resultado del análisis estadístico los resultados pertenecen a un mismo grupo.

Figura 20  
Intervalo de las medias del tiempo de inyección



### Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Dato	N	Mean	Grouping
T iny ECU	10	3,670	A
T iny Calc	10	3,640	A

Fuente: los autores

## Conclusiones

La metodología propuesta para la obtención de la cartografía de la ECU es válida, ya que al obtener los valores reales de la ECU y compararlos con los valores que resultaron de la regresión lineal, se obtiene un promedio del error que es menor al 6%, permitiendo, además, conocer el mapa cartográfico del sistema de inyección semi-secuencial con el que trabaja la ECU de experimentación.

Los valores obtenidos en base a la cartografía de inyección y su ecuación matemática son válidos, debido a que al comparar las medias por el método de Tukey, comparten un mismo grupo, demostrando así que al aplicar métodos estadísticos como la regresión lineal multivariable, se pueden generar ecuaciones matemáticas que orienten los valores de tiempo en mseg de inyección.

Se observó que la ECU empleada de un Chevrolet Luv 2.2 ha sido mapeada con respecto al sensor MAP, lo que quiere decir que los tiempos de inyección van a depender en gran medida de este sensor.

A bajas temperaturas, cercanas a 0° C, se observa que el sensor ECT comienza a tener relevancia, al igual que el sensor MAP al momento de inyectar combustible. La razón es que el vehículo necesita aumentar la temperatura de funcionamiento.

## Referencias bibliográficas

- Alexandrov, G. y Ferdinand, R. (2007). *Automotive Engineering: Engine Fuel Map Design*. New Jersey, Rutgers University.
- Anand, P. (2012). *Development of research engine control unit using fpga -based embedded control system*. Tamilnadu, India.
- Chevrolet. (2002). *Manual de mantenimiento de LUV 2.2 L*. España, Recuperado de: <https://thernstufjeoprat.files.wordpress.com/2015/10/manual-de-camioneta-chevrolet-luv-2-2-2.pdf>
- Dziubiński, M., Litak, G., Drozd, A. y Żukowicz, P. (2017). Modelling characteristics of spark ignition engine injection system. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 11(2), 103-117.



- Farrugia, M. (2008). *Electronic Engine Management and Calibration Manual*. Reata Electronics.
- Farrugia, M., Farrugia, M. y Sangeorzan, B. (2005). *ECU Development for a Formula SAE Engine*. (Nº 2005-01-0027). SAE Technical Paper.
- Ferrari, A. y Pizzo, P. (2017). Fully predictive Common Rail fuel injection apparatus model and its application to global system dynamics analyses. *International Journal of Engine Research*, 18(3), 273-290.
- GM-EECU. (2009). *Corsa 1.6 8v: interpretando: mapa de inyección principal*. Recuperado de <http://gmecu.blogspot.com/2009/12/interpretando-mapa-de-inyeccion.html>
- Gutiérrez González, E. (2003). *Sistema de Inyección no cartográfico para motores de ciclo otto. Gestión de transitorios*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González, E. G., Flórez, J. A. y Arab, S. (2008). Development of the management strategies of the ECU for an internal combustion engine: computer simulation. *Mechanical systems and signal processing*, 22(6), 1356-1373.
- Hartman, J. (2004). *How to tune and modify engine management systems*. Minneapolis: Motorbooks International.
- Hartman, J. (2003). *How to tune and Modify Engine Management System*. Minneapolis: MBI Publishing Company.
- Hiticas, I., Marin, D. y Mihon, L. (2013). Modelling and operational testing of pulse-width modulation at injection time for a Spark-Ignition Engine. *Tehnicki vjesnik/Technical Gazette*, 20(1).
- Jasilionis, A., Nagurnas, S. y Melaika, M. (2012). *Use of Mathematical Methods of Statistics for Analyzing Engine Characteristics*. Mokslas: Lietuvos Ateitis, 4(4), 351.
- Kawabe, T., Miyamoto, T., Ukai, S., Nakagawa, R., Sakaki, T. y Kawashima, I. (2016). *U. S. Patent No. 9,488,124*. Washington, DC: U. S. Patent and Trademark Office.
- Krumen, J. (2010). *ECUs and engine calibration 201. Performance Electronics*. Recuperado de [www.pe-ltd.com](http://www.pe-ltd.com).
- López Sánchez, J. A. (2009). *Diseño de la implantación de un sistema de inyección y encendido electrónico en un motor mono cilíndrico. Construcción y aplicación de los periféricos (sensores y actuadores) así como definición de las cartografías de control para un vehículo experimental*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Màquines i Motors Tèrmics.

- Nevot Cercós, J. (2000). *Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales para la gestión de la mezcla aire-gasolina en un motor alternativo*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Romero, C. A., Márquez, J. F. y Orozco, J. M. (2006). Módulo de un sistema de inyección electrónico de gasolina basado en el microcontrolador Intel 8751 3. *Scientia et technica*, 1(30).
- Tamaki, S., Sakayanagi, Y., Sekiguchi, K., Ibuki, T., Tahara, K. y Sampei, M. (2014). On-line feedforward map generation for engine ignition timing control. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 5691-5696.
- Tinizaray Romero, D. G. (2016). *Reprogramación electrónica del control de inyección y encendido del motor CBR 600 F4i, para el vehículo Formula Student*. [Tesis]. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Latacunga, Carrera de Ingeniería Automotriz.
- Wagner, R., Daw, C. y Green, J. (2001). *Low-Order Map Approximations of Lean Cyclic Dispersion in Premixed Spark Ignition Engines*. SAE Technical Paper 2001-01-3559. Recuperado de <https://doi.org/10.4271/2001-01-3559>.
- Winward, E., Deng, J. y Stobart, R., (2010). Innovations in Experimental Techniques for The Development of Fuel Path Control in Diesel Engines. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 3(1), 594-613.
- Yelvington, P. E., Rallo, M. B. I., Liput, S., Tester, J. W., Green, W. H. y Yang, J. (2004). Prediction of performance maps for homogeneous-charge compression-ignition engines. *Combustion Science and Technology*, 176(8), 1243-1282.



# Análisis de la influencia en la calibración de las bujías en los gases de escape de un motor de ciclo Otto

---

Juan Diego Valladolid Q.<sup>1</sup>

Luis Enrique Urgiles S.<sup>2</sup>

Edgar Patricio Fernández A.<sup>3</sup>

Paul Vicente Carchi R.<sup>4</sup>

## Resumen

En el presente documento se indica la influencia que tienen las bujías en los gases de escape, con tres tipos de calibraciones. La experimentación se llevó a cabo en un vehículo de ciclo Otto, aplicado a vehículos Chevrolet Grand Vitara de diferentes años, considerando que existe diferencia en el recorrido entre los vehículos, tomando como referencia un vehículo del año 2015, teniendo en cuenta que ningún vehículo ha sido reparado. Se considera que los vehículos están diseñados y afinados para su desempeño a nivel del mar. De las diferencias geográficas que se tienen en el Ecuador nace la necesidad de analizar cómo influyen las diferentes calibraciones de las bujías convencionales, teniendo en cuenta que el estudio se realiza en la ciudad de Cuenca y se encuentra ubicada a 2 550 msnm.

## Palabras clave

Bujías, calibración, motor Otto.

- 
- 1 Docente-investigador de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT). Máster en Control y Automatización Industriales (jvalladolid@ups.edu.ec).
  - 2 Estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz (lurgiless@est.ups.edu.ec).
  - 3 Estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz (efernandeza@est.ups.edu.ec).
  - 4 Estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz (pcarchi@est.ups.edu.ec).

### **Abstract**

*This document indicates the influence of the spark plugs in the exhaust gases, with 3 types of calibrations. The experimentation was carried out on an Otto cycle vehicle, applied to Chevrolet Grand Vitara vehicles of different years, considering that there is a difference in the route between vehicles, taking as a reference a vehicle of the year 2015, taking into account that no vehicle has been repaired. Vehicles are considered to be designed and tuned for their performance at sea level. From the geographical differences in Ecuador, there is a need to analyze how the different calibrations of conventional spark plugs influence, taking into account that the study is conducted in the city of Cuenca and is located at 2 550 meters above sea level.*

### **Keywords**

*Spark plugs, calibration, Otto engine.*

## **Introducción**

El proceso de combustión de un vehículo de 4 tiempos a gasolina depende de varios componentes como (Payri, 2011):

- Bujías de encendido
- Cables de alta tensión
- Módulo de encendido o distribuidor
- Bobinas de encendido

Depende la influencia de estos elementos para que la combustión sea adecuada, de tal manera que la mezcla aire-combustible se inflame en su totalidad. Por lo general, al aplicar un mantenimiento preventivo o correctivo en el sistema de encendido se reemplazan las bujías, teniendo esta variable alta influencia en la combustión de la mezcla (Zumba, 2016).

Por una mala combustión se producen gases contaminantes, la mayoría de estos nocivos para la salud, dependiendo de la frecuencia de exposición (Arizaga, 2015). Siendo objeto de estudio la calidad de la chispa que inflama la mezcla aire-combustible, de la literatura expuesta en Payri (2011) surge la necesidad de variar la calibración de las bujías para determinar qué pasa si existe un exceso o escases de la calibración en las mismas. Por otra parte, la calidad del combustible también influye en el proceso de combustión de un motor de combustión interna ciclo Otto, teniendo un consumo según Arizaga (2015) del 12,72% de

gasolina extra con un octanaje de 86 y de 43,75% de gasolina súper con un octanaje de 92 en el país, razón por la cual tiene mayor influencia la gasolina extra sobre los gases contaminantes. Teniendo en cuenta estos antecedentes surge la necesidad de realizar un estudio del comportamiento de los gases de escape en 3 vehículos Chevrolet Grand Vitara con diferentes recorridos en la ciudad de Cuenca, considerando que los tres vehículos no han sido reparados, que los vehículos utilizan el mismo tipo de combustible y que los vehículos serán analizados en tres regímenes de revoluciones como: ralentí (800 rpm), media carga (2 500 rpm) y plena carga (3 500 rpm).

## Metodología

Según el reporte del aire de Cuenca emitido por la Empresa Municipal de Movilidad Tránsito y Transporte (EMOV) en el años 2015 (Arizaga, 2015), entidad dedicada al control de la calidad del aire en la ciudad, los niveles de contaminación del aire de la ciudad están aumentando y con ello el riesgo de enfermedades respiratorias, oculares, entre otras, siendo los motores de combustión interna los principales agentes de contaminación por su funcionamiento. Considerando que casi la totalidad del parque automotor de Cuenca utiliza un motor de combustión interna, son fuentes notables de contaminación. Por tanto, se hace conveniente estudiar el comportamiento de los gases al variar la calibración de las bujías, para proponer la calibración ideal y evitar la contaminación por gases de escape. Como resultado del funcionamiento de un motor de combustión interna se tienen gases de escape, los cuales se dividen en contaminantes y no contaminantes (Arizaga, 2015).

## Gases no contaminantes

Se consideran gases no contaminantes a aquellos componentes de los gases de escape de un vehículo que no representan peligro o riesgo para la salud de las personas en corto o largo plazo de exposición y no contribuyen a la contaminación del medio ambiente (Arizaga, 2015).

### *Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )*

Es un componente que se encuentra en la atmosfera, en niveles de aproximados a 0,035%. Las exposiciones a corto plazo de este componente no producen efectos nocivos en la salud.

### *Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )*

Es un gas incoloro e inodoro no combustible, representa el 78% del aire y ayuda al proceso de combustión en conjunto con el aire de admisión, siendo expulsado en su mayoría puro en los gases de escape.

### *Oxígeno ( $\text{O}_2$ )*

Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Representa el 21% del aire, es imprescindible para el proceso de combustión. Al darse la mezcla perfecta, el consumo de oxígeno debe ser total, cuando se da una combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.

### *Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )*

Es aspirada por el motor debido a la humedad del aire, puede ser producida por la fase de calentamiento del motor. Es un subproducto de la combustión y es expulsada por el sistema de escape.

## **Gases contaminantes**

Se consideran gases contaminantes a aquellos componentes de los gases de escape que representan un peligro o riesgo para la salud de las personas, y favorecen a la contaminación del medio ambiente a corto y mediano plazo (Arizaga, 2015)

### *Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ )*

Es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico, siendo uno de los principales contaminantes emitidos por los motores de

combustión interna. En el cantón Cuenca la altitud es de 2 550 msnm, existiendo menos cantidad de oxígeno, provocando una menor eficiencia en los procesos de combustión y mayor emisión de CO. Los efectos en la salud pueden ser:

- Dolor de cabeza, mareo, sensación de desvanecimiento y cansancio.
- A niveles altos puede causar somnolencia, alucinaciones, convulsiones y pérdida de conocimiento. Puede causar cambios en la memoria y en la personalidad, confusión mental y pérdida de visión.
- A niveles excesivos puede provocar la muerte, ya que disminuye la cantidad de oxígeno disponible para las células, lo cual dificulta la función celular.

### *Hidrocarburos (HC)*

Los combustibles no combustionados o combustionados parcialmente, emitidos por un automóvil, están formados por la unión de hidrógeno y carbono. Los motores a gasolina emiten mayor cantidad de hidrocarburos en comparación con un motor diésel, entre los hidrocarburos, el benceno es cancerígeno. Las principales fuentes de benceno en el aire son las emisiones provenientes de vehículos con motores de ciclo Otto y las pérdidas por evaporación durante la manipulación, distribución y almacenamiento de gasolina. Los efectos en la salud y el medioambiente son:

- Producir irritaciones en las membranas mucosas y pueden causar lesiones sistemáticas al ser inhalados.
- Causa somnolencia, irritación ocular y tos.
- Causan daños al medio ambiente por su reacción con los óxidos de nitrógeno en la formación de ozono troposférico y otros agentes fotoquímicos.

### *Óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )*

Es de aspecto amarillento y se forma durante la combustión en los vehículos con motores de ciclo Otto. Es un gas tóxico, irritante y



precursor de la formación de partículas de nitrato, que favorecen la producción de ácidos en el ambiente.

El  $\text{NO}_x$  y el  $\text{NO}_2$  se generan por altas temperaturas que se producen en la combustión, provocando la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno del aire para dar óxido nítrico y este luego se oxida parcialmente a  $\text{NO}_2$ . Por lo tanto, los motores de combustión interna emiten óxidos de nitrógeno con proporciones variables de  $\text{NO}_x$  y  $\text{NO}_2$ .

Efectos en la salud y el medioambiente:

- En periodos cortos de exposición el  $\text{NO}_2$  puede provocar irritaciones del sistema respiratorio y ocular.
- Una exposición prolongada afecta al sistema inmune y al pulmón, causando cambios irreversibles en el tejido pulmonar.
- Es una sustancia corrosiva para la piel y el tracto respiratorio, provocando enrojecimiento y quemaduras cutáneas graves.
- Tiene gran influencia en la formación de smog fotoquímico.

### *Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )*

Es un gas incoloro, no inflamable y no explosivo, la principal fuente de emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión de productos derivados del petróleo y del carbón. Sus efectos en la salud y el medioambiente son:

- Daños en la mucosa ocular y vías respiratorias, afectando las defensas del sistema respiratorio provocando ataques de tos.
- El contacto con la humedad del aire del  $\text{SO}_2$  forma ácido sulfúrico, lo que provoca la acidificación de suelos, lagunas y ríos, acelera la corrosión de materiales y produce efectos negativos en los vegetales.

## **Consideraciones de estudio**

Par lograr los fines del estudio se tienen en cuenta varias consideraciones, donde se explican los elementos a emplear.

### *Combustible utilizado*

Según el Centro de Prospectiva Estratégica del Ecuador (CE-PROEC), se establece el siguiente consumo de combustibles para el año 2012:

Tabla 1  
Consumo de combustibles en el Ecuador

Combustible	Galones	FBEP	%
Diésel	753 608 015	17,930	42,24%
Gasolina extra	761 906 621	18,141	43,75%
Gasolina súper	221 590 085	5,276	12,72%
GLP	5 129 541	122	0,29%
Total	1 741 694 262	41,469	100%

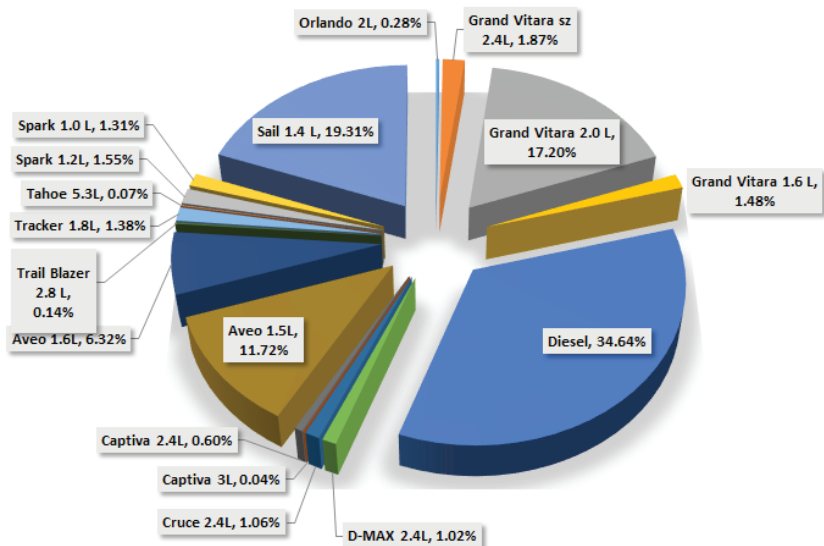
Fuente: Cevallos, 2015

Se observa que en el Ecuador existe un consumo de 43,75% de gasolina extra, razón por la cual este tipo de combustible será empleado en el estudio, teniendo como referencia un octanaje de 87.

### *Selección del vehículo*

Según la información proporcionada por la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2014), en el año 2014 se comercializaron 120 060 vehículos en el Ecuador, teniendo un 42,62% de vehículos Chevrolet, correspondiente a 53 574 unidades. De esta cantidad, a la provincia del Azuay le corresponde 5,3%, es decir, 2 842 vehículos. De estos vehículos el modelo de mayor demanda en la ciudad es el Chevrolet Grand Vitara.

Figura 1  
Venta de vehículos Chevrolet en Ecuador



Fuente: Serpa y Zumba, 2015

### Consideraciones del vehículo

Para el estudio se tomaron en cuenta vehículos que tengan de 5 000 km de recorrido en adelante. Otro criterio de inclusión fue el motor, el cual no debe haber sido reparado ni modificado. Para el estudio se consideraron tres vehículos, los cuales tenían una diferencia en el kilometraje de 100 000 km entre sí, para poder observar lo que ocurre con las diferentes calibraciones en los gases de escape:

- Un vehículo del año 2015 con 33 000 km de recorrido
- Un vehículo del año 2009 con 144 000 km de recorrido
- Un vehículo del año 2005 con 220 000 km de recorrido

## Materiales y métodos

### *Bujías*

Para el estudio se consideran bujías Bosch Platinum Plus FR-8DPX Germany R3 617, la cual se puede apreciar en la figura 2, puesto que son las que se comercializan con mayor frecuencia en la ciudad. Para el estudio se establecieron tres medidas de las bujías:

- 1 mm recomendado por el fabricante de la bujía (Bosch, 2016).
- 0,5 mm valor mínimo para que el vehículo encienda.
- 1,5 mm valor máximo para que el vehículo encienda.

Figura 2  
Bujía Bosch Platinum Plus FR8DPX



Fuente: Bosch, 2016

### *Analizador de gases automotriz*

Para el estudio se emplea un medidor de gases de escape automotriz NGA 6000 Qrotech, el cual se observa en la figura 3, proporciona los valores de: CO, HC, CO<sub>2</sub>, Lambda, Factor Lambda (AFR) y Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Figura 3  
Analizador de Gases Automotriz NGA 6000 QRORCH



Fuente: Qrotech, 2015

### **Software Minitab**

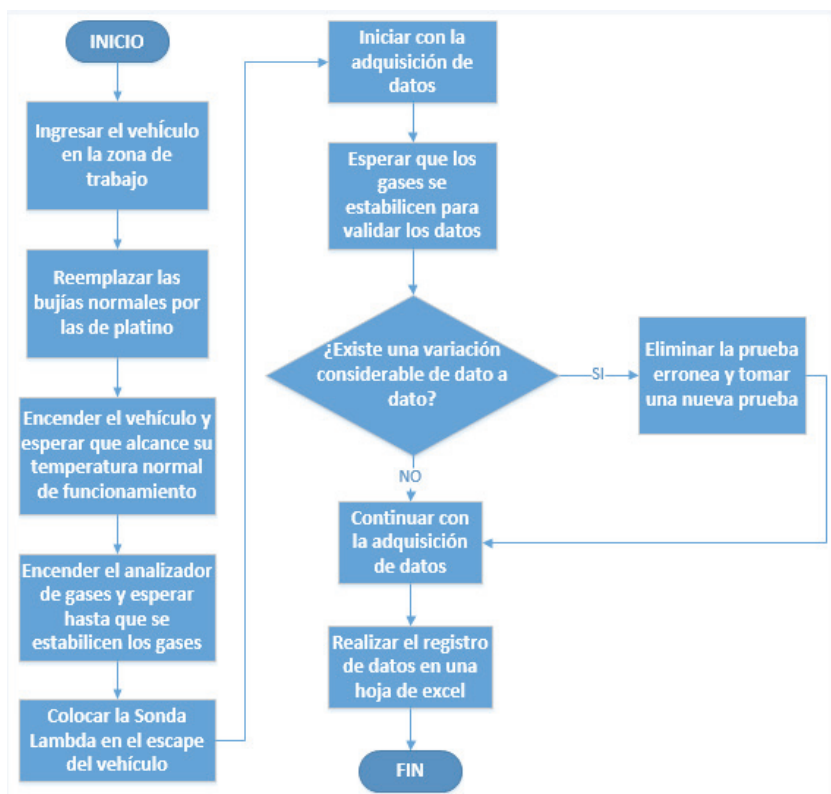
Este software tiene las herramientas para el análisis de datos de una manera efectiva y confiable, proporcionando resultados claros, los cuales servirán para la validación de las muestras tomadas, de tal manera que se reduzca el margen de error, ya sea por el equipo o por el proceso de medición.

### **Metodología y proceso de medición**

Para la obtención de los datos se plantea una metodología experimental, basada en la toma de datos a diferentes calibraciones de la bujía y a diferentes regímenes de revoluciones del motor de un vehículo Chevrolet Grand Vitara, para su posterior análisis de probabilidad. De esta manera se podrá establecer cómo se comportan los gases de escape al aumentar o disminuir la calibración de la misma y cómo estas calibraciones influyen en los vehículos, dependiendo del recorrido, en los gases de escape.

Para la toma de datos se ha considerado seguir una determinada secuencia como se indica en diagrama de flujo mostrado en la siguiente figura:

Figura 4  
Toma de datos



Fuente: los autores

Este proceso se realizó durante las tres mediciones establecidas y con cada vehículo.

## Gráficas obtenidas con software Minitab

Mediante el empleo del software Minitab se obtiene el comportamiento de los gases de escape en los vehículos utilizados, dependiendo

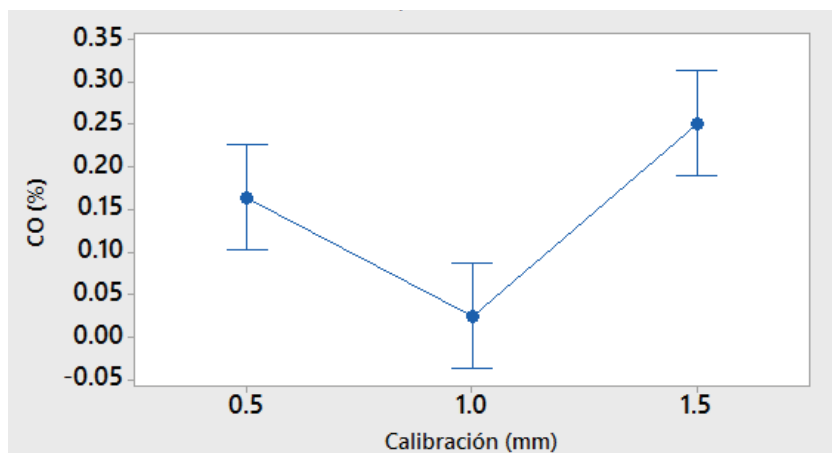
de la calibración de las bujías. Considerando que en el registro de resultados de las medidas obtenidas, se observa que las rpm del motor de cada vehículo no tienen gran influencia con los gases contaminantes.

Para el análisis no se consideran los siguientes parámetros: CO, CO<sub>2</sub>, Lambda y O<sub>2</sub>; porque los valores obtenidos de estos parámetros no representan gran influencia sobre los gases de escape, permaneciendo prácticamente constantes estos valores en las diferentes pruebas, esto se puede apreciar en las figuras de la 5 a la 16, correspondientes a la descripción de cada vehículo.

### *Análisis en el vehículo Grand Vitara 2005*

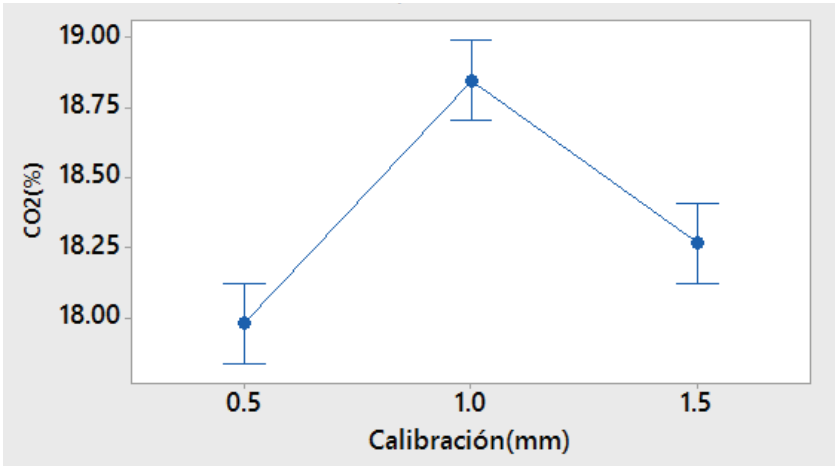
En el siguiente análisis se observa el comportamiento de los gases de escape con las diferentes calibraciones (0,5; 1; 1,5 mm) para el vehículo del año 2005 con un recorrido de 220 000 km.

Figura 5  
Comportamiento del monóxido de carbono



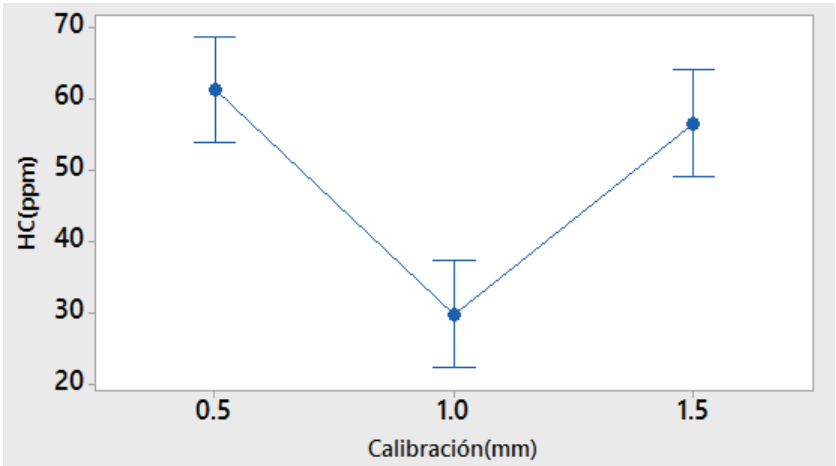
Fuente: los autores

Figura 6  
Comportamiento del dióxido de carbono



Fuente: los autores

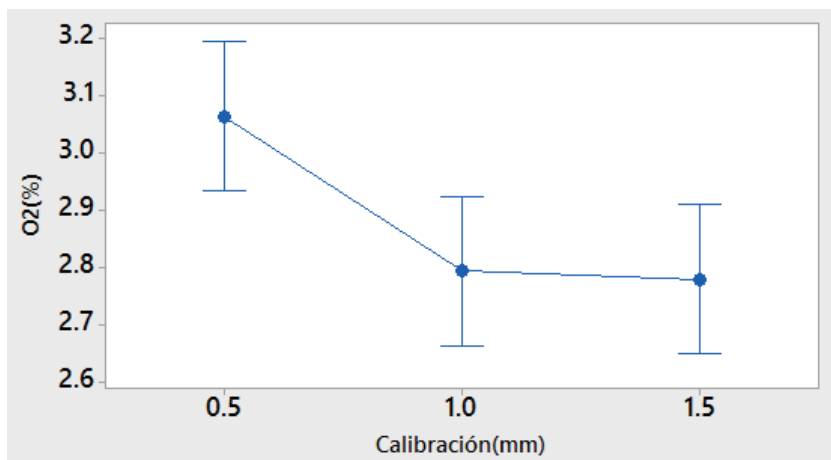
Figura 7  
Comportamiento de los hidrocarburos



Fuente: los autores



Figura 8  
Comportamiento del oxígeno



Fuente: los autores

La figura 5 muestra que el CO con la calibración de 1 mm es menor que para las otras calibraciones, para este caso en la calibración de 0,5 mm el CO es mayor que para la de 1mm y menor que para la de 1,5 mm.

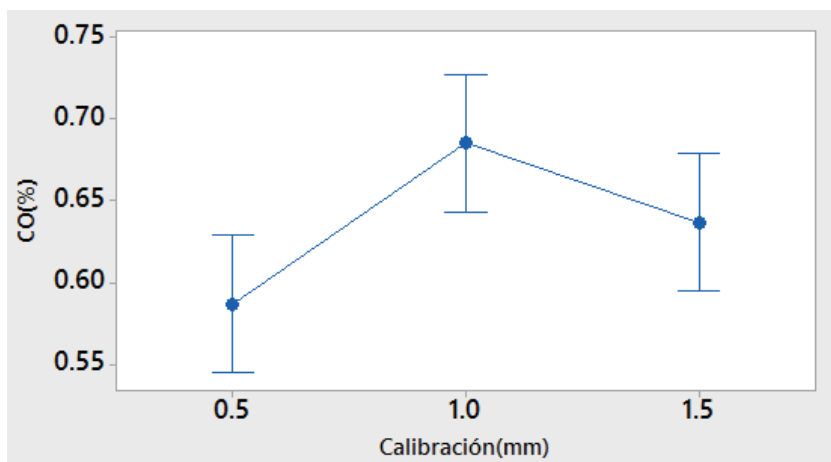
En la figura 7 se observa que los HC con una calibración de 1 mm son considerablemente bajos en comparación con las otras calibraciones. Con la calibración de 1,5 mm los HC son mayores comparando con la calibración de 1 mm y menor a la calibración de 0,5 mm.

En las figuras 5 y 7 se puede observar que con la calibración de 1,5 los HC aumentan y el CO es mayor en comparación de la calibración de 1.5mm. Para el caso de la calibración de 0,5 mm los HC aumentan, pero el CO es menor en comparación con la calibración de 1,5 mm. Por lo tanto, para este vehículo la medida de calibración de bujías adecuada es de 1 mm, puesto que los gases contaminantes en comparación con las otras medidas son menores.

### *Análisis en el vehículo Grand Vitara 2009*

En el siguiente análisis se observa el comportamiento de los gases de escape con las diferentes calibraciones (0,5; 1; 1,5 mm) para el vehículo del año 2009 con un recorrido de 144 000 km.

Figura 9  
Comportamiento del monóxido de carbono



Fuente: los autores

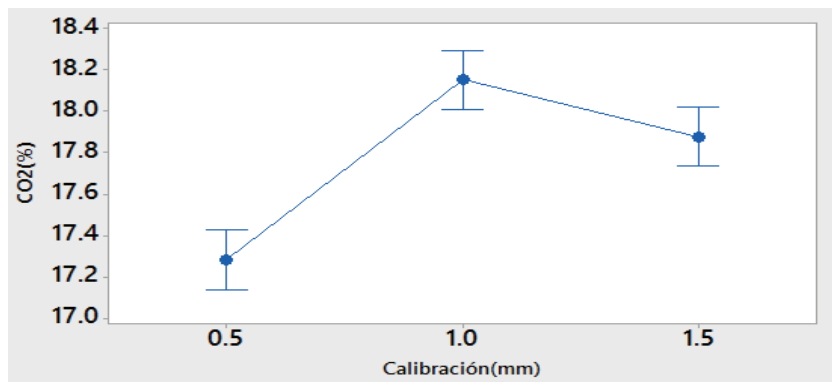
La figura 9 muestra que con una calibración de 0,5 mm los valores son menores en comparación a las medidas de 1 y 1,5 mm, para este caso el CO en 1 mm de calibración son más altos que para las otras medidas.

En la figura 11 se observa que los HC con una calibración de 1 mm son menores en comparación con las otras calibraciones, para este caso se observa que para la calibración de 1,5 mm los HC no varían en gran cantidad en comparación con los de la calibración de 1 mm.

Para este vehículo según el análisis realizado se puede trabajar con una calibración de 1mm como en una calibración de 1,5 mm, puesto que los HC aumentan, pero no en valores considerados y en el caso

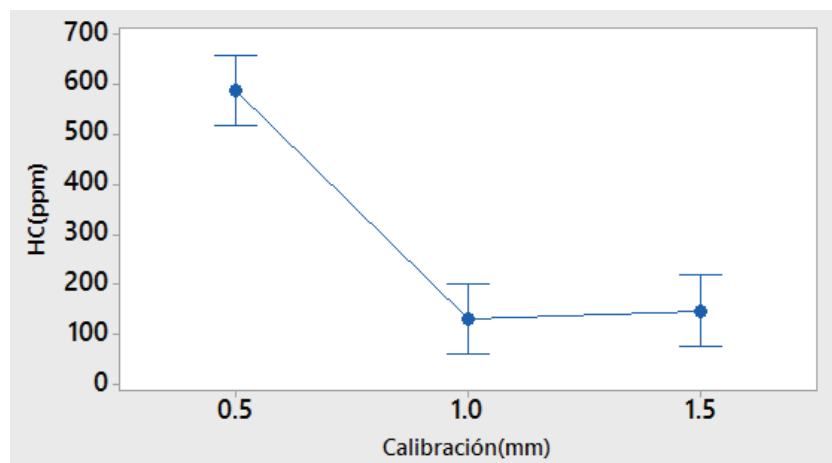
del CO los valores son intermedios en comparación de las medidas de 1 mm y 0,5 mm.

Figura 10  
Comportamiento del dióxido de carbono



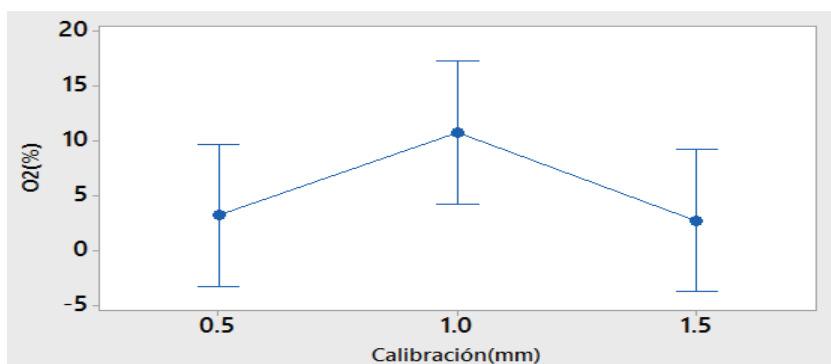
Fuente: los autores

Figura 11  
Comportamiento de los hidrocarburos



Fuente: los autores

Figura 12  
Comportamiento del oxígeno

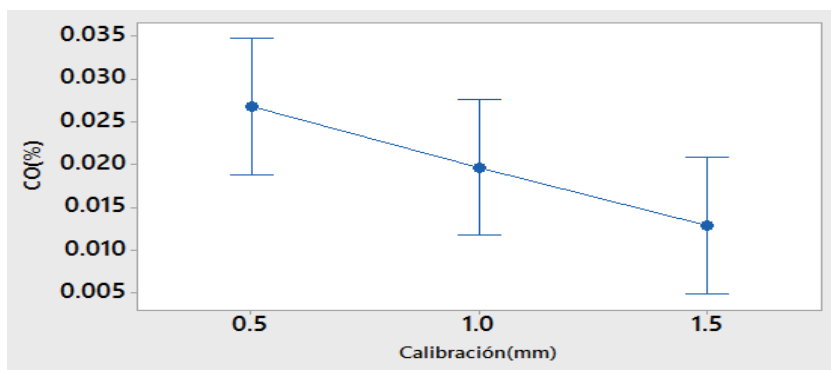


Fuente: los autores

### *Análisis en el vehículo Grand Vitara 2015*

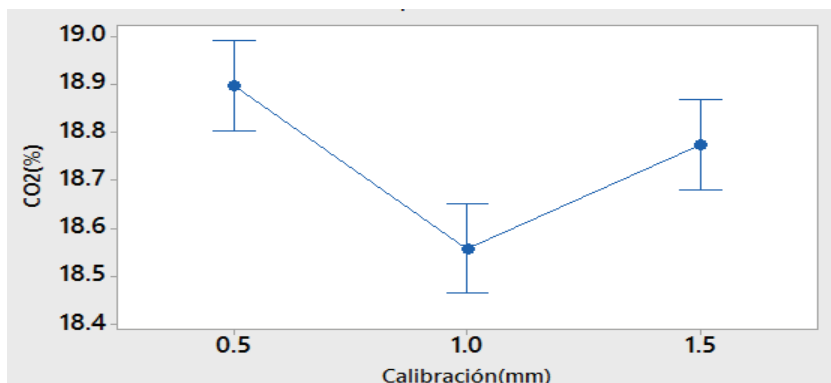
En el siguiente análisis se observa el comportamiento de los gases de escape con las diferentes calibraciones (0,5; 1; 1,5 mm) para un vehículo Chevrolet Grand Vitara 2015 con un recorrido de 33 000 km.

Figura 13  
Comportamiento del monóxido de carbono



Fuente: los autores

Figura 14  
Comportamiento del dióxido de carbono



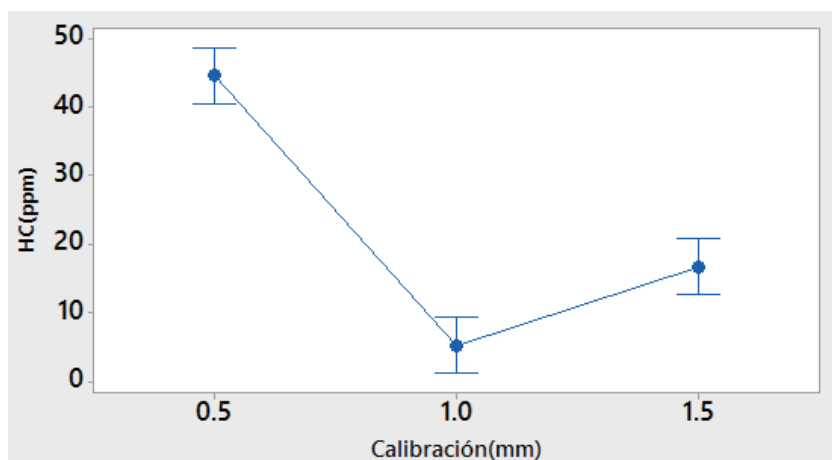
Fuente: los autores

La figura 13 muestra que para la calibración de 1,5 mm los valores de CO son menores en comparación de las otras medidas, para este caso en la calibración de 1 mm los valores de CO son menores en comparación a la calibración de 0,5 mm, pero mayores a 1,5 mm.

La figura 15 muestra que para la calibración de 1mm los valores de HC son menores en relación a las otras calibraciones, para este caso la calibración de 1,5 mm los HC sufren un leve incremento en comparación a la calibración de 1,5 mm.

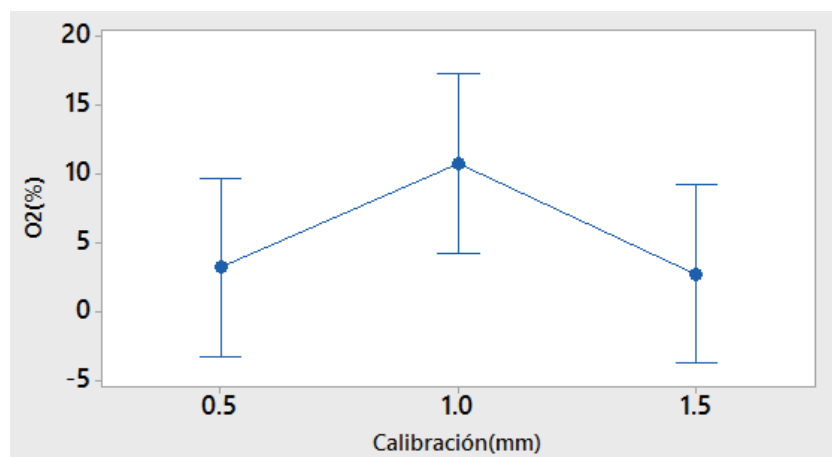
Para este caso se puede emplear una calibración de 1 mm y 1,5 mm puesto que para la calibración de 1 mm el CO tiene un valor intermedio en comparación a las calibraciones de 0,5 y 1,5 mm, considerando que para la calibración de 1,5 mm el CO es menor en comparación las otras calibraciones. En el caso de los HC para la calibración de 1 mm son menores mínimamente en comparación con la calibración de 1,5 mm y significativamente a los valores de la calibración de 0,5 mm.

Figura 15  
Comportamiento de los hidrocarburos



Fuente: los autores

Figura 16  
Comportamiento del oxígeno



Fuente: los autores

## Conclusiones

Al finalizar el análisis se ha determinado que la calibración adecuada para reducir las emisiones de gases contaminantes es de 1 mm, independientemente del kilometraje del vehículo, puesto que en esta calibración los hidrocarburos (HC) disminuyen considerablemente en comparación con las calibraciones de 0,5 y 1,5 mm.

En el análisis realizado se ha determinado que la calibración de la bujía interviene directamente sobre los HC, siendo estos hidrocarburos uno de los principales contaminantes del medio ambiente y perjudiciales para la salud de las personas que se encuentren sometidas a este componente, pudiendo llevar a la muerte de una persona si se expone por largo tiempo.

En el análisis de los tres vehículos utilizados para el estudio, se ha determinado que una calibración menor a 1 mm aumenta los gases contaminantes, obteniendo una quema parcial de la mezcla aire-combustible, porque se reduce el tiempo de encendido de la mezcla, sin embargo, para los vehículos del año 2015 y 2009 se podría trabajar con una calibración un tanto inferior a 1 mm.

Para el caso de los vehículos 2015 y 2009, se ha determinado que una calibración mayor a 1 mm no es perjudicial para el medioambiente y el comportamiento de los HC aumenta en comparación a la calibración de 1 mm, pero en cantidades reducidas.

En el análisis de gases se determina que las revoluciones del vehículo tienen menor influencia, comparado con la calibración de la bujía. Llegando a determinar que con una calibración correcta de la bujía el vehículo genera una cantidad menor de gases contaminantes.

## Referencias bibliográficas

AEADE. (2016). *Análisis de consumo de combustible de los vehículos de categoría M1 que circulan en el centro histórico de la ciudad de Cuenca en horas de*

- máxima demanda en función de ciclos de conducción*. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12167/1/UPS-CT006109.pdf>
- AEADE. (2014). *Anuario*. Recuperado de [www.aeade.net](http://www.aeade.net)
- Arizaga, A. A. (2015). *Informe de calidad del aire en Cuenca*. Cuenca: EMOV.
- Bosch. (2016). *Bujías de encendido*. Alemania: Bosch.
- Cevallos, J. (mayo, 2015). *Estimación del consumo de combustible en el transporte terrestre en el Ecuador*. Recuperado de [http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps\(2\)/2015\\_0.5.pdf](http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps(2)/2015_0.5.pdf)
- Minitab. (2017). *Minitab Statistical Software*. Recuperado de <https://www.minitab.com>
- Qrotech. (2015). *Manual de operación NGA6000*. Corea: Nextech Co.
- Payri, F. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. México: Reverté.
- Serpa, G. y Zumba, X. (2010-2014). *Reporte de ventas*. Cuenca: Repositorio EPN. Recuperado de [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15362/1/CD-7058.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15362/1/CD-7058.pdf).
- Zumba Tenezaca, X. (2016). *Determinación de la influencia en emisiones contaminantes, torque, potencia y consumo de combustible de un vehículo con motor ciclo Otto, de inyección electrónica de gasolina, mediante la variación de 6 tipos de bujías*. Quito: EPN.





# Monitoreo y control de sistemas activos del vehículo basado en el bus de comunicación CAN<sup>1</sup>

J. Paúl Ortiz<sup>2</sup>

Oswaldo S. Ortega<sup>3</sup>

Daniel A. León<sup>4</sup>

## Resumen

En este documento se presenta el estudio de los principales protocolos de comunicación del vehículo, haciendo énfasis en el protocolo CAN, que es usado para el monitoreo, diagnóstico y control de las variables que intervienen en su funcionamiento. Además, se muestra la estructura base para el diseño e implementación de aplicaciones desarrolladas para los vehículos Volkswagen Golf y Kia Soul EV, en donde el usuario puede monitorear y controlar diferentes sistemas del vehículo correspondientes al área de confort como iluminación, elevadores, bloqueo centralizado, entre otros. En el desarrollo se utilizó como hardware una tarjeta Arduino Due con *shield* CAN y para el desarrollo del software se utilizó la plataforma de programación LabVIEW. Las interfaces de usuario desarrolladas no solo permiten la lectura de las tramas CAN presentes en el bus, sino también la escritura de datos y la visualización en tiempo real de las variables de estos sistemas. La infraestructura de interconexión con el bus CAN del vehículo es de bajo costo y los resultados obtenidos son muy satisfactorios al tener tiempos de latencia por debajo de los 100 ms.

## Palabras clave

Bus CAN, Arduino, LabVIEW, protocolo.

- 
- 1 Los autores desean agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por haber permitido trabajar en sus laboratorios de Autotrónica y Electric Mobility Lab (EmoLab) de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, sede Cuenca, para el desarrollo del presente trabajo.
  - 2 Docente investigador en el Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte (GIIT) de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (jortizg@ups.edu.ec).
  - 3 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (oortegao@est.ups.edu.ec).
  - 4 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (dleonm5@est.ups.edu.ec).

**Abstract**

*This document presents the study of the main communication protocols of the vehicle, emphasizing the CAN protocol that is used for the monitoring, diagnosis and control of the variables involved in its operation. In addition, it shows the base structure for the design and implementation of applications developed for Volkswagen Golf and Kia Soul EV vehicles, where the user can monitor and control different systems of the vehicle corresponds to the comfort system as the lighting system, central locking, among others. In the development an Arduino card with CAN shield was used as hardware, and the LabVIEW programming platform was used for software development. The developed user interfaces not only allow the reading of the CAN frames present in the bus, but also the writing of data and the real-time visualization of the variables of these systems. The infrastructure of interconnection with the CAN bus of the vehicle is low cost and the results obtained are very satisfactory having latency times below 100ms.*

**Keywords**

*CAN bus, Arduino, LabVIEW, protocol.*

**Introducción**

Los avances tecnológicos implementados en los diferentes sistemas del automóvil provocan que existan una gran cantidad de unidades de control electrónica gestionando el funcionamiento de los diferentes sistemas del vehículo. Esto, en primera instancia, trae un incremento sustancial del cableado dentro del vehículo, lo que incrementa notablemente el peso, volumen y costo del vehículo. El protocolo de comunicación CAN se desarrolló como una solución frente a este inconveniente.

El sistema de bus serie CAN, siglas cuyo significado en español es: Control de Área de Red, nació en febrero de 1986, cuando el grupo Robert Bosch GmbH lo presentó en el congreso de la Sociedad de Ingeniería de la Automoción. Desde entonces, CAN se ha convertido en uno de los protocolos líder en la utilización del bus serie (Li y Liu, 2008).

Este protocolo de comunicación fue desarrollado para brindar una mayor funcionalidad y seguridad en la comunicación de los elementos electrónicos del vehículo, además de reducir el peso y optimizar el espacio dentro del vehículo debido a la reducción del cableado. “La red CAN bus conecta a diferentes procesadores por medio de dos cables trenzados por los cuales es enviada y recibida la información codificada de forma digital” (Volkswagen y Wolfsburg, 2009). Asimismo, el “pro-

toloco CAN, en la actualidad es el más utilizado para aplicaciones en sistemas de comunicación de datos de vehículos, siendo implementado por todas las fabricas automotrices desde el año 2008” (Ruiz y Crespo, 2013).

Por estos motivos, en este documento se presenta el desarrollo de aplicaciones basadas en CAN, diseñadas para los vehículos Volkswagen Golf y el Kia Soul EV. La arquitectura es de bajo costo, con el uso de una tarjeta Arduino. Además, las interfaces de usuario permiten controlar desde el ordenador los diferentes sistemas del área de confort del vehículo de una manera amigable.

El presente documento se estructura de la siguiente manera. En el primer subtema se realiza un estudio de los protocolos y medios de comunicación presentes en un vehículo. En el segundo, se estudian las características más relevantes de los sistemas CAN automotrices. En el tercero, se presenta el desarrollo de aplicaciones para el monitoreo y control de los sistemas del vehículo. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

## **Medios de comunicación en los vehículos**

### ***Protocolo LIN***

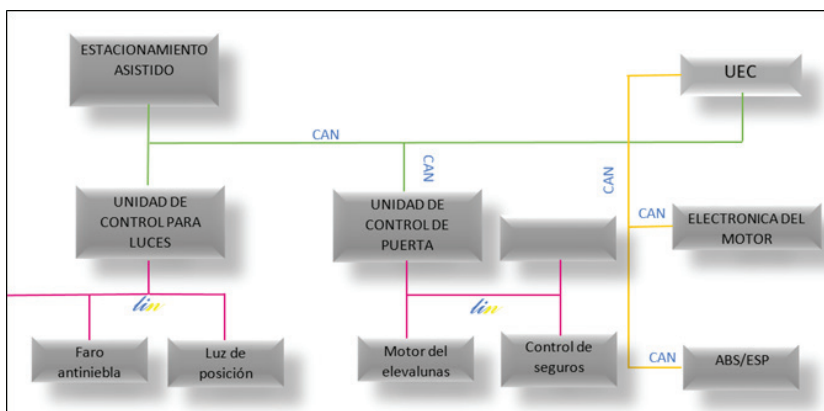
El bus de Red Local de Interconexión (LIN), mostrado en la figura 1, fue desarrollado con el fin de crear una red estándar de comunicación de bajo costo, si bien el sistema CAN satisface sin problema todas las necesidades de comunicación entre los sistemas del vehículo, los altos costos de implementación de hardware y software de este sistema son una limitante para su uso en dispositivos de menor rendimiento como controladores de potencia de elevallas y asientos. LIN entrega una comunicación rentable a un costo relativamente bajo, en sistemas sencillos donde la versatilidad del CAN no es necesaria.

Tabla 1  
Características del protocolo LIN

Descripción	Valor
Número de conductores	1
Velocidad de transmisión	1 - 20 Kbit/s
Tamaño del mensaje	11 bytes
Aplicaciones	Comunicación entre actuadores simples

Fuente: Dani, 2017

Figura 1  
Topología: protocolo de comunicación LIN



Fuente: los autores

## Protocolo MOST

El bus MOST fue específicamente desarrollado para la intercomunicación de los “sistemas de entretenimiento de audio y video”. Este es un sistema de transmisión de datos que utiliza fibra óptica plástica (POF). La señal se genera mediante un LED del lado de transmisión, en el lado de recepción la señal óptica es convertida en una señal eléctrica por un fotodiodo.

Tabla 2  
Características del protocolo MOST

Descripción	Valor
Número de conductores	1
Velocidad de transmisión	21,2 Mbits/s
Tamaño del mensaje	64 bytes
Aplicaciones	Comunicación de elementos de audio y video

Fuente: Dani, 2017

Figura 2  
Topología: protocolo de comunicación MOST



Fuente: los autores

*Protocolo FlexRay*

Este protocolo de comunicación para vehículos (figura 3) fue creado por el consorcio FlexRay entre los años 2000 y 2009. Es conside-

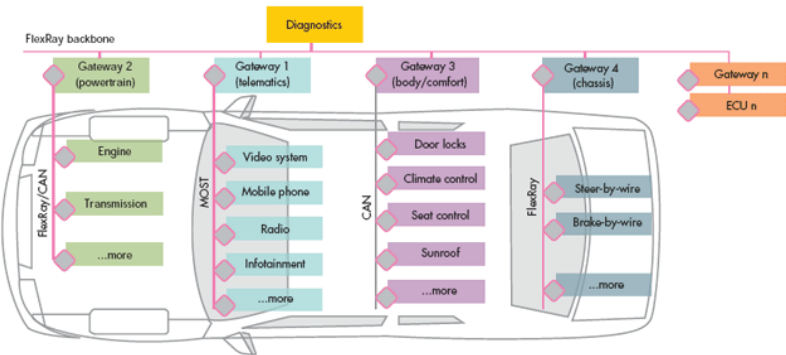
rado más avanzado que los protocolos de comunicación CAN y MOST en el ámbito de precio y prestaciones.

Tabla 3  
Características del protocolo FlexRay

Descripción	Valor
Número de conductores	2
Velocidad de transmisión	10 Mbits/s
Tamaño del mensaje	32 bytes
Aplicaciones	Comunicación de unidades electrónicas del vehículo

Fuente: González, 2017

Figura 3  
Topología: protocolo de comunicación FlexRay



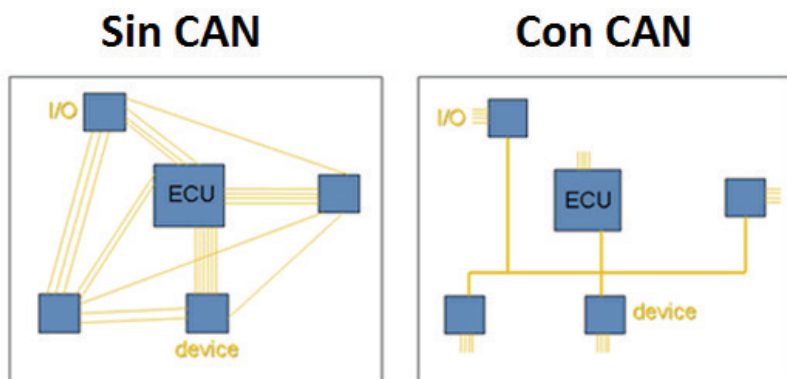
Fuente: González, 2017

Sistemas can

El sistema CAN es una red relativamente económica y perdurable que permite la intercomunicación entre dispositivos. Uno de los mayores beneficios es que permite a las unidades de control comunicarse por completo a través de un solo par de cables en lugar de diferentes

entradas analógicas y digitales para cada dispositivo en el sistema (Oxer y Blemings, 2009). Las principales diferencias en la arquitectura de la red CAN y una tradicional, radica en la disminución de cableado y se incorporan nodos de comunicación que desarrollan diversas funciones para los sistemas del vehículo. Estas topologías se muestran en la siguiente figura.

Figura 4  
Bus CAN



Fuente: Oxer y Blemings, 2009

CAN está compuesto de diferentes capas físicas, dichas capas son clasificadas bajo ciertos aspectos de la red, como lo son los niveles eléctricos, esquemas de señales, impedancia en los cables, tasa máxima de transmisión, entre otras:

- *CAN de Alta Velocidad.* CAN de alta velocidad es la capa física más común. Las redes de CAN de alta velocidad están implementadas con dos cables y permiten la comunicación con tasas de transferencia de hasta 1 Mb/s.
- *Hardware CAN de Baja Velocidad/Tolerante a Fallas.* Las redes de CAN de baja velocidad/tolerante a fallas también están implementadas con dos cables, pueden comunicarse con dispositivos



a una tasa de hasta 125 kb/s, y cuentan con transceptores con capacidades de tolerancia a fallas.

- *Hardware CAN de Un Solo Cable.* Las interfaces CAN de un solo cable pueden comunicarse con dispositivos a una tasa de hasta 33,3 kb/s (88,3 kb/s en modo de alta).

### ***Bus CAN del sistema de confort***

Este se encarga de intercomunicar todas las unidades de control del sistema de confort. Consta de las siguientes unidades de control: una unidad de control central y dos o cuatro unidades de control de puertas.

La información enviada por el sistema de confort trata acerca del estado operativo en el que se encuentran trabajando las funciones de cada sistema. Por ejemplo, información acerca de qué mando a distancia por radiofrecuencia ha sido accionado; en qué estado operativo se encuentra el cierre centralizado y si existen averías, entre otros.

#### ***Configuración del CAN-Bus en el sistema de confort***

Los cableados en las unidades de control se juntan en forma de estrella, en un punto. La ventaja de esto es que, si una de las unidades de control presenta una avería, las demás siguen operativas y transmitiendo su protocolo de datos. Los datos que se transmiten a través de CAN-Bus de confort son de las siguientes funciones:

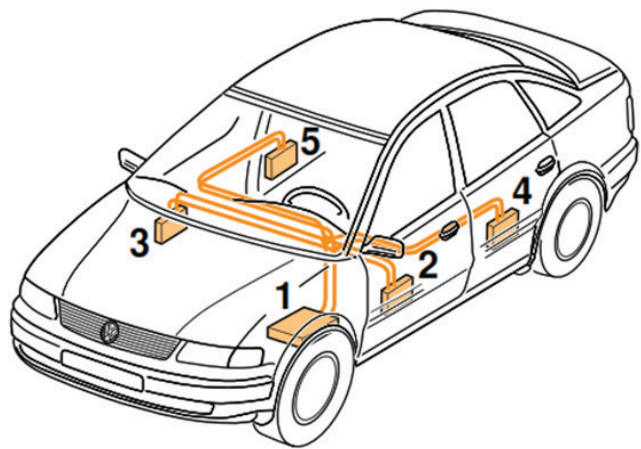
- Cierre centralizado
- Elevalunas eléctricos
- Iluminación de los mandos
- Retrovisores exteriores regulables y calefactables eléctricamente
- Autodiagnóstico

#### ***Características del CAN-Bus en el sistema de confort***

En la figura 5 se puede observar la localización de las unidades de control del sistema de confort dentro del vehículo con asignación de su

prioridad, mientras que la tabla 4 presenta las características de trabajo más relevantes de este bus de comunicación.

Figura 5  
Bus-CAN del área de confort



Fuente: Volkswagen y Wolfsburg, 2009

Tabla 4  
Características del Bus-CAN de confort

Descripción	Valor	Orden de prioridades
Número de conductores	2	1. Unidad de control central
		2. Unidad de control lado conductor
Velocidad de transmisión	0-125 Kbits/s	3. Unidad de control lado acompañante
Tamaño del mensaje	16 bytes	4. Unidad de control trasera izquierda
Aplicaciones	Comunicación de unidades electrónicas del vehículo	5. Unidad de control trasera derecha

Fuente: Volkswagen y Wolfsburg, 2009

En virtud de que los datos del sistema de confort se pueden transmitir a una velocidad relativamente baja, es posible incorporar un transceptor de bajo rendimiento. Ello supone la ventaja de que, si se avería un cable del bus de datos, es posible conmutar a la función monoalámbrica, siendo posible seguir transmitiendo los datos.

### ***Bus CAN del sistema de transmisión y motor***

Este sistema de comunicación se encarga de intercomunicar tres partes principales del sistema de tracción del automóvil: la unidad de control para el sistema de encendido del motor, la unidad de control para ABS/EDS y la unidad de control para cambio automático en el caso de los vehículos que incluyan una caja de transmisión electrónica.

Con cada datagrama se transmiten actualmente diez protocolos de datos. Cinco de la unidad de control para el motor, tres de la unidad de control para ABS/EDS y dos de la unidad de control para cambio automático. La información enviada a través de este sistema es de vital importancia para que los diferentes dispositivos de control cumplan de manera eficiente con sus funciones.

La información a través del área de tracción para la unidad de control de ABS/EDS es para la seguridad de los ocupantes del vehículo, en el caso de la unidad de control del motor es vital para la gestión del encendido y la cantidad de combustible que se inyecta a cada cilindro.

#### ***Características del CAN-Bus de en el área de la tracción***

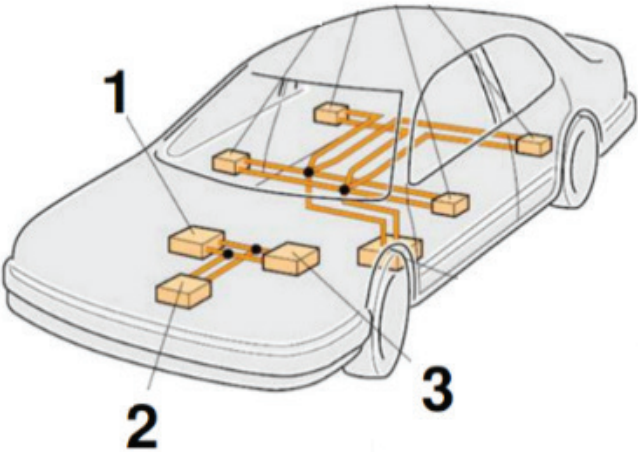
Para una utilización óptima de los datos enviados en el sistema de tracción es necesario que estos se transmitan muy rápidamente, para lograr este efecto se requiere de un transceptor de gran capacidad.

Tabla 5  
Características del Bus-CAN de control de tracción y motor

Descripción	Valor	Orden de prioridades
Número de conductores	2	1. Unidad de control para ABS/EDS
Velocidad de transmisión	125-1000 Kbits/s	2. Unidad de control para el motor
Tamaño del mensaje	16 bytes	3. Unidad de control para cambio automático
Aplicaciones	Comunicación de unidades electrónicas del vehículo	

Fuente: Volkswagen y Wolfsburg, 2009

Figura 6  
Bus-CAN del área de tracción



Fuente: Head y Petrol, 2017

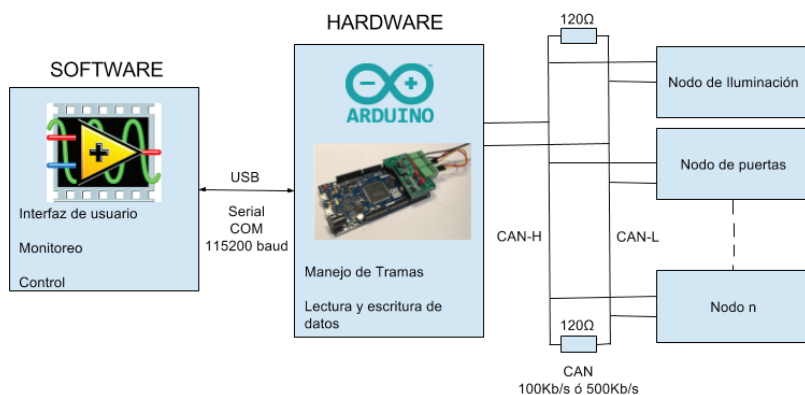
## Desarrollo de aplicaciones

### Arquitectura de interconexión

Este sistema ejecuta dos funciones principales que son la monitorización de acciones del sistema de confort y el control de los elementos que conforman el sistema. La aplicación enlaza el computador con la tarjeta electrónica Arduino Due mediante una conexión serial virtual por USB, mientras que la tarjeta electrónica sirve de interfaz con los puertos de comunicación CAN (CAN- H y CAN-L). La conexión entre los puertos CAN del Arduino y los del vehículo es establecida mediante un cable conector OBDII.

La arquitectura de las aplicaciones presentadas en este trabajo se muestra en la figura 7. Está compuesta por dos partes principales, la primera es la parte física o hardware, y la segunda un software de interfaz de usuario.

Figura 7  
Arquitectura basada en Arduino



Fuente: los autores

### *Hardware basado en Arduino Due*

El hardware usado es un Arduino Due que consta con un *shield* CAN dual y un procesador de 32 bits. Al combinar la interfaz de puerto CAN dual, el microcontrolador Arduino Due un cable OBD2 o SAE J1939 y librerías de software de código abierto, se logra una potente solución de bus CAN dual basada en Arduino.

Este hardware, además, nos permite una velocidad de transmisión de datos en un rango de 5 Kb/s hasta 1 Mb/s, consta de una memoria flash de 512 kb, una SRAM de 96 Kb, 2 puertos CAN con conectores de terminal de tres pines (Atmel, 2015).

### *Software*

El software para monitoreo y control se realizó con la herramienta informática LabVIEW, que es una plataforma y entorno de desarrollo de sistemas con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama “lenguaje G”, donde la G simboliza que es lenguaje gráfico. Es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos.

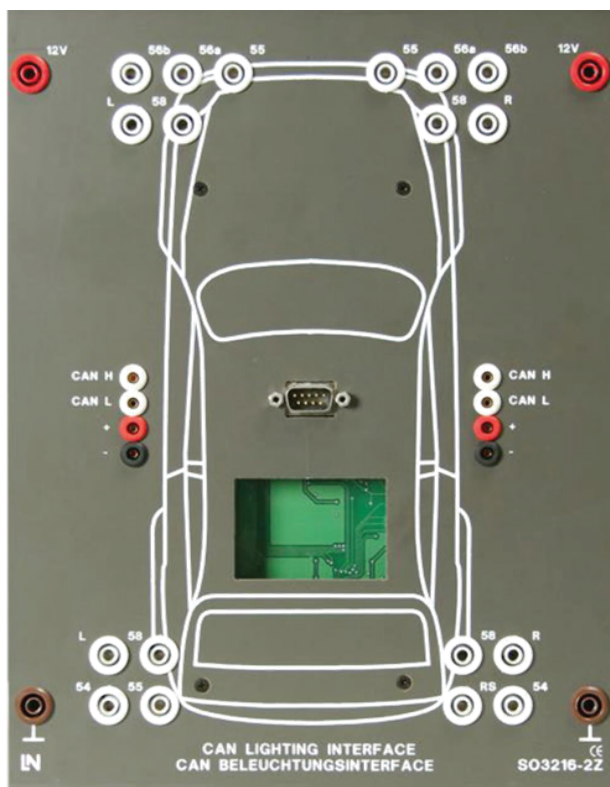
### ***Instrumentación y control del sistema de iluminación del vehículo Volkswagen Golf***

Para el desarrollo de este sistema se utilizó un banco didáctico que consta de una “Interfaz de iluminación (SO3216-2Z)” (figura 8), que simula los sistemas de iluminación del vehículo Volkswagen Golf, por lo que maneja la misma comunicación CAN entre sus sistemas, facilitando la identificación de las tramas de comunicación entre cada unidad de control del área de iluminación.

La “Interfaz de iluminación (SO3216-2Z)” representa un nodo CAN adicional, que dispone de salidas de potencia para el control de

componentes reales de iluminación. El equipo está programado de manera que las salidas se puedan controlar por medio del módulo CAN (SO4204-7K), como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8  
Módulo CAN (SO4204-7K)



Fuente: González y Vásquez, 2013

La tabla 6 muestra el levantamiento para la adquisición, identificación y clasificación de los datos enviados por el sistema de confort a través del Bus-CAN para el funcionamiento de las unidades de control.

Tabla 6  
Datos del sistema de iluminación y puertas

Descripción	Id can	Dlc (bytes longitud)	Datos	Función
Faro antiniebla	4	1	4	Encendido
Faro antiniebla	4	1	0	Apagado
Luces de emergencia	2	3	1F 40 80	Encendido
Luces de emergencia	2	3	00 40 80	Apagado
Luz baja	4	1	61	Encendido
Luz baja	4	1	0	Apagado
Luz direccional izquierda	2	3	3A 40 80	Encendido
Luz direccional izquierda	2	3	30 40 80	Apagado
Luz direccional derecha	2	3	25 40 80	Encendido
Luz direccional derecha	2	3	20 40 80	Apagado
Luz de carretera	4	1	61	Encendido
Luz de carretera	4	1	63	Apagado
Luz de freno	3	1	8	Encendido
Luz de freno	3	1	0	Apagado
Puerta derecha abierta	D	3	01 00 00	Abierto
Puerta derecha cerrada	D	3	00 00 00	Cerrado
Puerta izquierda abierta	C	3	01 00 00	Abierto

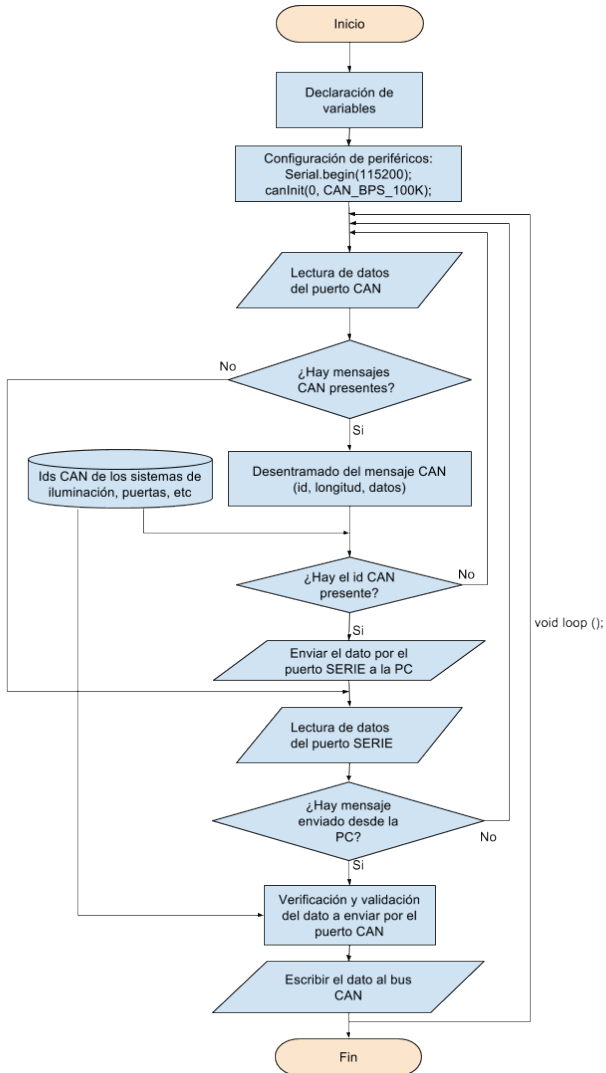
Fuente: los autores

### *Programación Arduino*

Para la programación de Arduino se utilizó como base el programa de protocolo de prueba de comunicación de los puertos CAN que nos entrega el fabricante. A esta programación se le realizó algunos cambios y adaptaciones para que cumpliera con los requisitos de funcionamiento del sistema. Este sistema ocupa únicamente el puerto de comunicación CAN0, al que se le designó el trabajo de escritura y lectura de datos provenientes del banco didáctico o vehículo conectado. En la figura 9 se puede observar la estructura del *firmware* de la tarjeta Arduino.



Figura 9  
Diagrama de flujo del *firmware* de Arduino



Fuente: los autores

Al iniciar la programación, se realizó en primera instancia la activación del puerto serial que permita la comunicación de la tarjeta Arduino con el computador mediante un cable USB, después es activado el controlador del puerto CAN, si el puerto CAN no se inicializa de manera adecuada se envía a través del puerto serial un mensaje de fallo.

Una vez iniciado el puerto CAN, esta espera 1 000 milisegundos para recibir datos, si el puerto Can0 recibe datos dentro de ese lapso envía a través del puerto serial hacia el computador el conjunto de datos separando cada byte de información con una coma, si el puerto no recibe ninguna comunicación dentro del lapso establecido envía a través de puerto serial el mensaje: "CAN0: Error during data transmission".

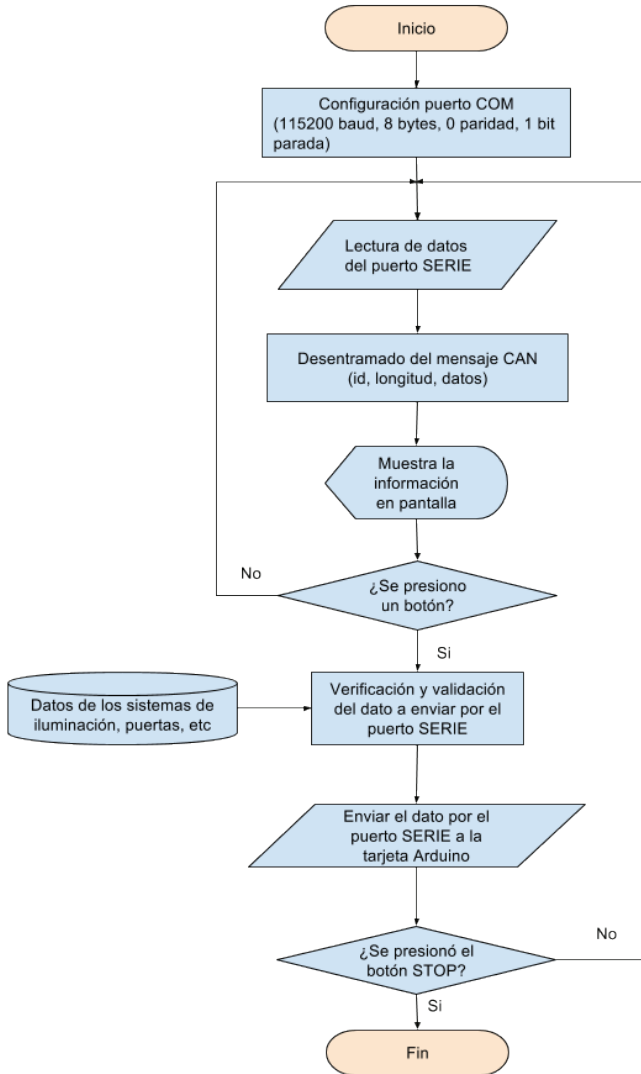
Para la parte de envío de datos a través del puerto CAN, el programa identifica un código que es recibido desde el computador y lo clasifica a través de una estructura "case", una vez identificado el código recibido se envía a través del puerto CAN un mensaje conformado por el ID, longitud y dato correspondiente al código recibido, los códigos enviados desde el computador representan una parte del sistema del vehículo a controlar.

Por ejemplo, si la PC envía el dato "A", el Arduino escribirá en el bus CAN la trama de activación del faro antiniebla. La codificación utilizada desde la PC son las letras del alfabeto que corresponden a cada elemento en descrito en la tabla 6.

### *Software*

El software desarrollado es el que permite establecer la comunicación entre el computador y la tarjeta Arduino a través de un puerto de comunicación COM. Para realizar este enlace, LabVIEW ofrece una solución muy rápida y sencilla que permite la comunicación mediante un puerto VISA, el cual establece una comunicación directa entre el programa y el puerto serie COM, donde se encuentre conectada la tarjeta que trabajará una velocidad de 115 200 baudios. En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo de la estructura del software de monitoreo y control.

Figura 10  
Diagrama de flujo: software de monitoreo y control



Fuente: los autores

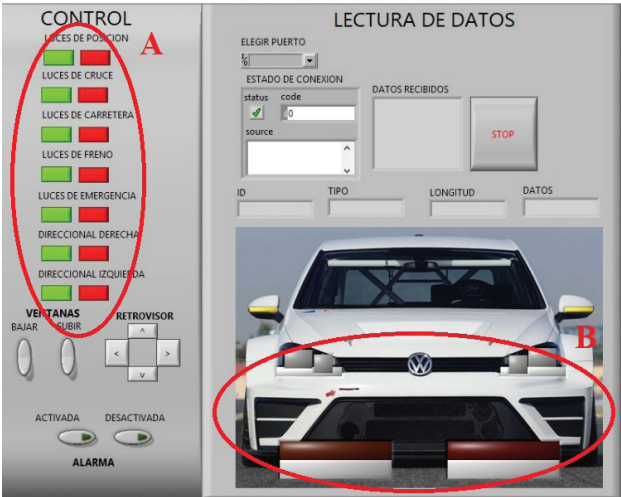
Para la obtención de los datos se utiliza una herramienta Reading, que entrega los datos del mensaje en un formato de texto, el mensaje es desentramado en sus diferentes partes (ID, longitud, datos), se toma cada trama del mensaje y se muestran de forma individual en cuadros de texto, el “data” es dividido por bytes e ingresado en una estructura “case”, con la cual se realiza el control de los indicadores gráficos del programa.

En la parte de control, al presionar un botón del área de control del software que se ilustra en la figura 11 (a), el software identifica el botón presionado mediante una estructura de eventos, esta estructura envía el nombre del botón presionado a una estructura “case”, la cual identifica el botón presionado, posteriormente esta verifica y valida el dato a enviar por el puerto SERIE. El dato es enviado con el uso de la herramienta Write, la cual recibe el dato desde la estructura “case” y lo envía por el puerto serial hacia la tarjeta Arduino.

Figura 11  
Interfaz gráfica del programa

a) elementos de control

b) indicadores de iluminación



Fuente: los autores

En la figura 11 se puede observar la interfaz gráfica del software realizado. Esta interfaz está dividida en dos secciones: la sección de control (a) y la monitorización (b). La sección de monitorización consta de unas pestañas que permiten al usuario observar los datos que están enviando los sistemas de iluminación a través del bus CAN, y de un indicador gráfico que muestra al usuario qué luces están activas o apagadas dentro de su vehículo.

El sistema se conecta con la maqueta de iluminación por medio de dos cables que salen de uno de los puertos CAN de la tarjeta Arduino y se conecta en el módulo CAN SO4204-7K (figura 8), como se muestra a continuación:

Figura 12  
Prueba del sistema de monitoreo y control bus CAN



Fuente: los autores

### *Instrumentación y control del sistema auxiliar del vehículo Volkswagen*

El sistema auxiliar está compuesto por las cuatro puertas del vehículo que contiene un módulo de comunicación CAN. Para el desarrollo de la instrumentación y control de este sistema se utilizó una puerta del Volkswagen, que es parte de la maqueta didáctica del sistema de iluminación.

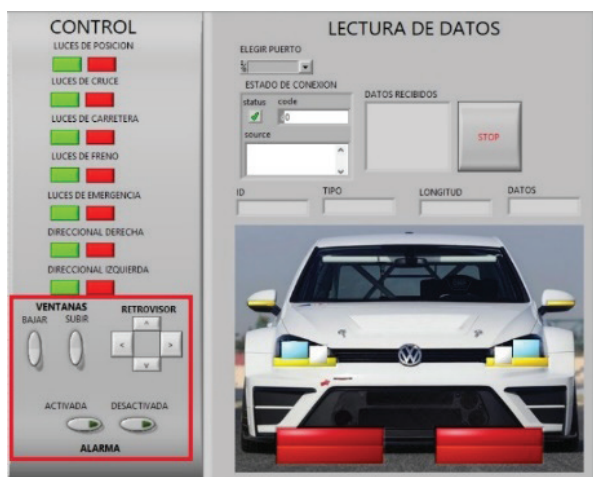
Para el levantamiento de datos de comunicación CAN de la puerta se utilizó el mismo monitor CAN del programa LabSoft, el cual es un

software didáctico que forma parte de las maquetas de iluminación y emula a un monitor de comunicación CAN.

Para la instrumentación y control de este sistema se utilizó la misma programación de control de Arduino desarrollada en el subtema “Programación Arduino”, a la cual se le añadió los datos de este sistema y se modificó la tasa de transmisión de datos a 100 Kbits/s, velocidad a la que opera el sistema de las puertas del vehículo.

Debido a que el sistema de luces y puertas son parte de un mismo sistema de comunicación CAN dentro de un solo vehículo, se añadió al software del subtema “Programación Arduino”, un espacio destinado al control de los elementos de las puertas. Las figuras 12 y 13 muestran la interfaz de usuario y la maqueta didáctica en la que se dispone de una sola puerta, por este motivo fue incorporado en el software únicamente un área de control destinado a la puerta del conductor del vehículo.

Figura 13  
Interfaz gráfica del programa, elementos de control  
de puertas, ventanas y retrovisores



Fuente: los autores

Tabla 7  
Datos del sistema auxiliar

Descripción	ID CAN	DLC (bytes longitud)	Datos	Función
Puerta izquierda cerrada	C	3	00 00 00	Cerrado
Alarma	A	1	5	Activado
Alarma	A	1	0A	Apagado
Bloqueo de puertas	5	3	06 00 00	Cerrado
Bloqueo de puertas	6	3	00 00 00	Abierto
Ventana cerrada en su totalidad	C	3	00 00 01	Encendido
Ventana abierta en su totalidad	C	3	00 00 02	Encendido
Luz parqueo	2	3	1F 40 80	Encendido
Luz parqueo	2	3	00 40 80	Apagado
Luz direccional izquierda	2	3	3A 40 80	Encendido
Luz direccional izquierda	2	3	30 40 80	Apagado
Luz direccional derecha	2	3	25 40 80	Encendido
Luz direccional derecha	2	3	20 40 80	Apagado
Retrovisor derecho sube	14	1	1	Encendido
Retrovisor gira izquierda	14	1	4	Encendido
Retrovisor girando derecha	14	1	8	Encendido
Retrovisor bajando	14	1	2	Encendido

Fuente: los autores

### *Instrumentación del vehículo Kia Soul EV*

Con el fin de satisfacer las necesidades de comunicación de todos los sistemas electrónicos que contiene este vehículo, los fabricantes han colocado un sistema de conexión Bus-CAN de alta velocidad y capa-

cidad. El desarrollo de la instrumentación del vehículo Kia se centró en tres sistemas principales que son: sistema de iluminación principal, estado de puertas del vehículo, velocidad de las ruedas. La tabla 8 nos muestra las características principales del Bus de comunicación de este vehículo.

Tabla 8  
Características del bus CAN de datos (Kia Soul EV)

Descripción	Valor
Número de conductores	2
Velocidad de transmisión	500 Kbits/s
Tamaño del mensaje	8 bytes
Aplicaciones	Comunicación de unidades electrónicas del vehículo

Fuente: los autores

*Programación Arduino*

Se utilizó la misma programación de Arduino desarrollada anteriormente y en ella se eliminó la sección de envío de datos y se modificó la tasa de envío de datos a 500 Kbits/s. La figura 14 muestra el diagrama de flujo que sigue la programación realizada.

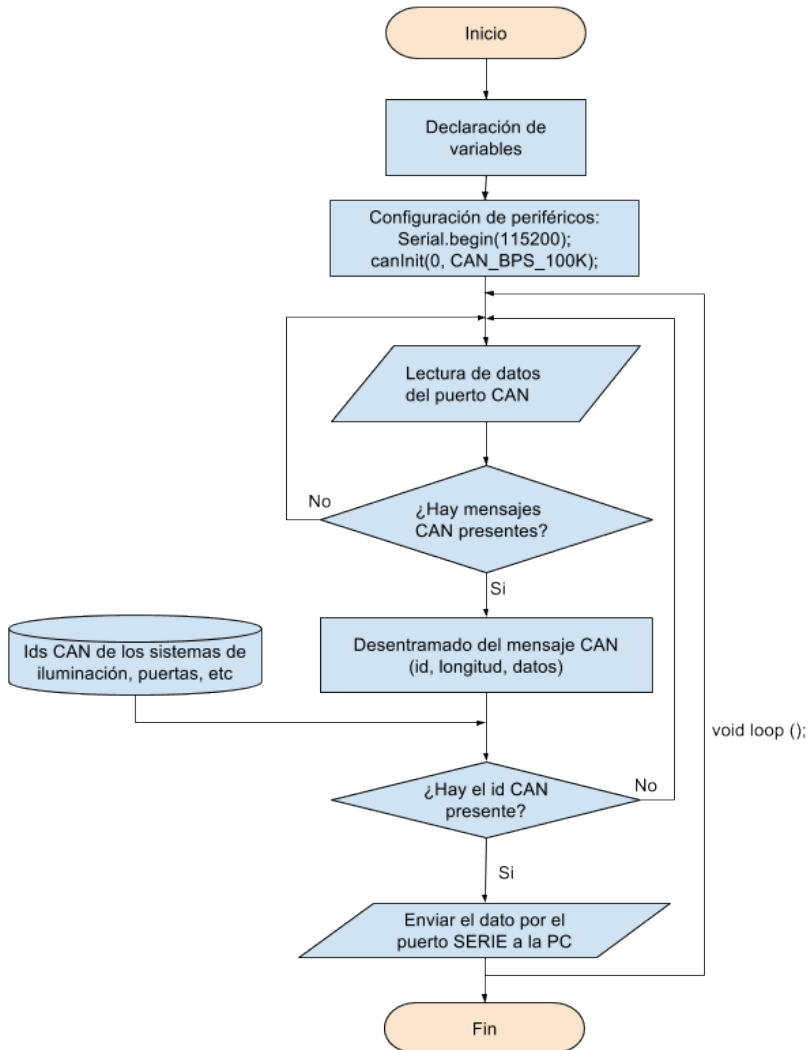
*Software*

El software desarrollado para esta sección es idéntico al empleado para la monitorización del vehículo Volkswagen de la figura 10. Este permite comunicarse con la tarjeta Arduino y recibir los datos que lleguen a ésta por el puerto CAN, el programa además separa y clasifica los datos recibidos.

Para desarrollar la instrumentación de los sistemas en el software, primero se realizó el levantamiento de datos. Las tablas 9, 10 y 11 muestran los datos referentes al sistema de iluminación, el estado de las puertas y la velocidad de las ruedas respectivamente.



Figura 14  
Diagrama de flujo programación Arduino



Fuente: los autores

Tabla 9  
Datos de lectura del sistema de alumbrado en el vehículo Kia Soul EV

ID	# de byte	Datos	Función	Estado del vehículo
Luces bajas				
50	1	1	Encendido	Apagado
	1	0	Apagado	Apagado
	1	81	Encendido	Encendido
	1	0	Apagado	Encendido
Luces de carretera				
50	1	2	Encendido	Apagado
	1	0	Apagado	Apagado
	1	82	Encendido	Encendido
	1	0	Apagado	Encendido

Fuente: los autores

Tabla 10  
Datos de lectura del estado de puertas en el vehículo Kia Soul EV

ID	# de byte	Datos	Función
Puertas frontales			
18	1	30	Puerta derecha abierta
		A0	Puerta izquierda abierta
		B0	puertas abiertas
		0	puertas cerradas
Puertas posteriores			
18	5	8	Puerta derecha abierta
		2	Puerta izquierda abierta
		0A	puertas abiertas
		0	puertas cerradas

Fuente: los autores

Tabla II  
 Datos de lectura de velocidad de las ruedas en el vehículo Kia Soul EV

Descripción	ID	# de byte	Datos
Rueda delantera derecha	4B0	1 y 2	variable
Rueda delantera izquierda	4B1	3 y 4	variable
Rueda posterior derecha	4B2	5 y 6	variable
Rueda posterior izquierda	4B3	7 y 8	variable

Fuente: los autores

Con los datos obtenidos en las tablas 9, 10 y 11, se desarrolló la instrumentación en el software que muestra mediante indicadores gráficos el estado de uso del sistema de alumbrado principal, el estado de las puertas y la velocidad de cada rueda del vehículo. Cuando las luces del vehículo son encendidas, el software recibe el mensaje enviado por el bus CAN, reconoce el código de encendido y acciona un indicador en la interfaz gráfica del mismo, de igual manera sucede con las puertas, al momento de ser abiertas se recibe el mensaje y se acciona un indicador visual de color azul (figura 15).

Figura 15  
 Interfaz gráfica del programa

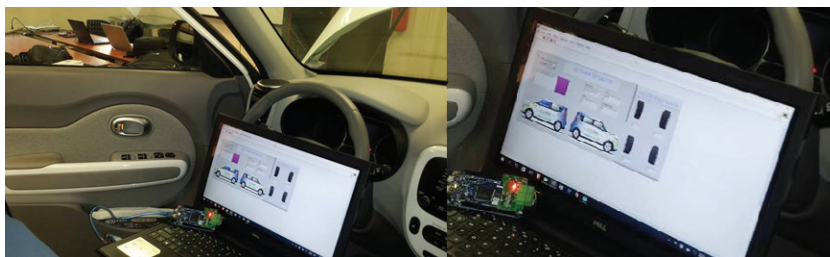


Fuente: los autores

Para el caso de la velocidad de las ruedas, el mensaje recibido se separa en los bytes correspondientes a cada rueda (tabla 11), tomando los datos en lenguaje hexadecimal y el software los transforma al sistema decimal, posteriormente se multiplica por una constante de conversión asignada por el fabricante del vehículo y se obtiene la velocidad en km/h de cada una de las ruedas.

El conexionado del sistema de monitoreo del bus CAN al vehículo se realizó mediante un cable OBDII, para ello se identificó los pines de conexión de los nodos CAN, donde el pin 6 y 14 del cable OBDII representan los puertos CAN High y Low respectivamente, la figura 16 nos muestra la prueba del monitor CAN bus realizada en el vehículo de la marca Kia, este sistema muestra de manera gráfica al usuario las acciones realizadas en el sistema de confort del vehículo, por ejemplo al abrir una de las puertas el software indicará que puerta del vehículo fue abierta encendiendo un indicador de color azul como se observa a continuación:

Figura 16  
Prueba del monitor CAN en el vehículo Kia



Fuente: los autores

## Conclusiones

Hoy en día, el estudio de los protocolos de comunicación en los vehículos es de suma importancia puesto que la tecnificación de los sistemas y el continuo avance tecnológico ha llevado a utilizar medios que

permitan la reducción y optimización del cableado, incorporando además mecanismos de control para el reconocimiento de anomalías.

La infraestructura de comunicación de hardware y software presentada en este trabajo es una potente herramienta para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo y/o control en múltiples sistemas vehiculares comerciales y no comerciales, en donde exista un bus de comunicación CAN abierto. Además, la amplia gama de tasas de transmisión reconfigurables que maneja la tarjeta de interconexión CAN (desde 5 Kb/s hasta 1 Mb/s) permite comunicaciones de baja y alta velocidad con variadas unidades de control del vehículo, tales como: la unidad de control de luces, la unidad de control del motor, la unidad de control de puertas, la unidad de control de ABS, la unidad de control multimedia, entre otras.

Las aplicaciones desarrolladas muestran en el primer y segundo caso el monitoreo y control de baja velocidad (100 Kb/s) de todas las variables del sistema de iluminación y control de puertas respectivamente, desarrollado en los módulos didácticos Lucas Nülle del vehículo Volkswagen Golf, en donde se visualizan estas variables en tiempo real en la PC de una manera robusta y amigable para el usuario. En el tercer caso se muestra la instrumentación de alta velocidad (500 Kb/s) de un vehículo eléctrico Kia Soul EV, en donde se presenta en el computador los estados del sistema de iluminación externa, estados de las puertas y la velocidad en km/h de cada rueda por separado.

Los datos que se transmiten por el bus CAN en los casos estudiados son específicos para cada tipo de vehículo y modelo, por ello, la seguridad del sistema radica principalmente en la protección de los hilos de comunicación CAN-H y CAN-L siendo estos de difícil acceso desde el exterior del vehículo impidiendo que se vulnere o intercepte las tramas y datos. Otro de los aspectos importantes de la seguridad de los vehículos con protocolo de comunicación CAN es que posee dos tipos de tramas, siendo estas síncronas y asíncronas; las primeras garantizan que el vehículo pueda determinar y auto-diagnosticar el estado de puertas, elevadores y la integridad del bus CAN, ya que recibe datos periódicos

de sus estados con latencias menores a 100 ms. Por otro lado, las tramas asíncronas, permiten tener el estado solo cuando haya un cambio en el funcionamiento, por ejemplo, cuando se enciende algún elemento del sistema de iluminación.

El bajo costo y la escalabilidad del sistema implementado permitirá la generación de un sin número de aplicaciones entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: monitoreo remoto, geoposicionamiento, bloqueo remoto de puertas, diagnóstico de consumo, mantenimiento predictivo, sensores inteligentes, entre otras.

## Referencias bibliográficas

- Atmel. (2015). SAM3X / SAM3A Series. *Atmel*, p. 1885.
- Dani. (septiembre, 2017). *Aficionados a la mecánica*. Recuperado de <http://www.aficionadosalamecanica.net/can-lin-most-bluetooth-intro.htm>
- González, C. y Vásquez, R. (2013). *Determinación de los niveles de iluminación e implementación de sistema automatizado en el automóvil*. Latacunga-Repositorio Digital ESPE.
- González, M. Á. (septiembre, 2017). *Mecatrónica*. Recuperado de <http://migueangelreyes.blogspot.com/2015/10/tecnologia-flexray.html>
- Head y Petrol. (agosto, 2017). *Petrol Head Garage*. Recuperado de <http://petrol-headgarage.com/Posts/caracteristicas-de-un-sistema-can-bus/>
- Li, R. y Liu, C. (2008). A Design for Automotive CAN Bus Monitoring. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China.
- Mabrouka, G., Mohamed, H. G. y Hafedh, T. (2016). An Intrusion Detection Method for Securing In-Vehicle CAN bus. *Sciences and Techniques of Automatic control*. Túnez.
- Oxer, J. y Blemings, H. (diciembre, 2009). *Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware*. Apress, p. 500.
- Roemer, F., Lamparter, M. y Lienkamp, M. (2017). A Method for Masterless Self-Assigning CAN Bus. *IEEE*.
- Ruiz, J. y Crespo, P. (2013). *Análisis de funcionamiento y aplicación de las redes multiplexadas en vehículos automotrices*. Cuenca: UDA.
- Salunkhe, A. A., Kamble, P. P. y Jadhav, R. (2016). *Desing And Implementation of CAN bus Protocol for Monitoring Paremeters*. International Confe-

rence On Recent Trends In Electronics Information Communication Technology. India.

Shi Shengbing, S. C. (2015). *CAN bus performance test technology*. International Conference on Electronic Measurement & Instruments.

Volkswagen y Wolfsburg. (14 de septiembre de 2017). *Mecanico Automotriz*. Recuperado de: <https://www.mecanicoautomotriz.org/1437-manual-sistema-can-bus-datos-bosch-diseno-funcionamiento>.

Zhou, F., Shuqin, L. y Xia, H. (2008). *Development Method of Simulation and Test System for Vehicle Body CAN Bus Based on CANoe*. World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China.

# Optimización del sistema de mantenimiento del equipo caminero a través de la gestión por procesos

---

Renato Fierro J.<sup>1</sup>

Walter López R.<sup>2</sup>

Luis Valdiviezo C.<sup>3</sup>

## Resumen

Mediante la metodología de gestión por procesos se formula una propuesta para la mejora del actual Sistema de Gestión de Mantenimiento de la Maquinaria Pesada del Gobierno Provincial del Cañar; ya que al momento cuenta con un planificación poco estructurada y sistematizada referente a la conservación de las unidades, generando que las intervenciones que se realizan en su mayor porcentaje sean de tipo correctivo, lo que aumenta los costos y limita la disponibilidad de los vehículos. La investigación parte de un diagnóstico previo del funcionamiento y competencias de la Sección de Mecánica, realizando el levantamiento de información, considerando la organización del personal, listado e historial de la maquinaria pesada y las tareas de mantenimiento que se desarrollan. Además, para tener una visión globalizada sobre el funcionamiento de la Sección de Mecánica y el cumplimiento de sus competencias se aplica el análisis DAFO (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades), para tener un diagnóstico objetivo sobre la situación actual lo cual permite realizar una proyección real y factible de ser aplicada. La inclusión de los índices CMD (confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad) faculta al sistema a controlar la gestión y la operación de mantenimiento, verificando el cumplimiento de los objetivos y metas trazadas referente a la conservación de los equipos.

## Palabras clave

Maquinaria, procesos, gestión, mantenimiento, índices.

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil.
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.



**Abstract**

*Through the process management methodology, a proposal is made for the improvement of the current Heavy Equipment Maintenance Management System of the Cañar Provincial Government; since at the moment it has a little structured and systematized planning regarding the conservation of the units, generating that the interventions that are carried out in their greater percentage are of corrective type, which increases the costs and limits the availability of the vehicles. The investigation starts from a previous diagnosis of the operation and competences of the Mechanics Section carrying out the information gathering, considering the personnel organization, list and history of the heavy machinery and the maintenance tasks that are developed. In addition, in order to have a globalized view on the functioning of the Mechanics Section and the fulfillment of its competencies, the SWOT analysis (weaknesses, threats, strengths and opportunities) is applied in order to have an objective diagnosis about the current situation, which allows a projection real and feasible to be applied. The inclusion of the CMD indices (reliability, maintainability and availability) empowers the system to control the management and the maintenance operation verifying the fulfillment of the objectives and goals established regarding the conservation of the equipment.*

**Keywords**

*Machinery, processes, management, maintenance, indices.*

**Introducción**

Al aplicar la metodología de gestión por procesos al sistema de mantenimiento del equipo caminero del GADPC (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar), se logra optimizar y tecnificar el modelo vigente de gestión y planificación de la Sección de Mecánica, ya que incorpora métodos y estrategias viables y convenientes para el desarrollo de las tareas de mantenimiento.

El proceso “es una secuencia de actividades que van añadiendo valor mientras se produce un determinado producto o servicio a partir de determinadas aportaciones” (Colín, 2002; Pérez, 2009). Esto se logra por medio de actividades estructuradas y organizadas, que apoyen las políticas y estrategias institucionales, con la finalidad de obtener un óptimo rendimiento en coste y facultando a ofertar un servicio de calidad, que permita cubrir las necesidades y cumplir las expectativas del beneficiario.

La gestión por procesos como base en la visión sistemática “apoya al aumento de la productividad y el control de gestión para mejorar en las variables clave” (Carrasco, 2008), facultando a optimizar el uso de recursos y generar los máximos beneficios y eficacia para lograr los objetivos propuestos por las unidades administrativas.

La misión del mantenimiento, de acuerdo al criterio de los autores Mora (2009) y Ahuja (2008), “es garantizar la máxima disponibilidad de los equipos con altos requisitos de confiabilidad y fiabilidad, en el tiempo solicitado para operar”, todo con el fin de producir un servicio de calidad que satisfagan los requerimientos solicitados, con los mayores índices de productividad para optimizar su rentabilidad y generar mayores ingresos. Los autores Mora (2009) y Mesa (*et al.*, 2006) explican que, por medio de la inclusión de los índices CMD (confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad), los cuales “se basan en métodos estadísticos, matemáticos y probabilísticos [se] pueden planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y la operación de mantenimiento”.

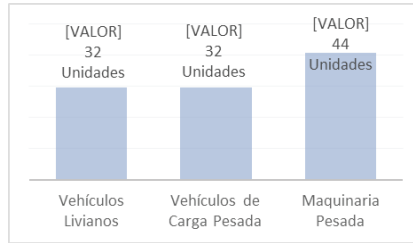
## **Análisis previo del sistema de gestión de mantenimiento**

### ***Recopilación y análisis de información***

Por información obtenida en la Dirección Administrativa del GADPC, al momento cuenta con 108 equipos, y se subdivide en 32 vehículos livianos (camionetas, jeep, motocicletas), 32 vehículos de carga pesada (volquetas, camiones, bus, entre otros), y 44 vehículos de maquinaria pesada (cargadora, tractor, motoniveladora, rodillo, entre otros), como se detalla en la figura 1.

El presente estudio se centra en la maquinaria y vehículos de carga pesada que posee la entidad, ya que se consideran indispensables en el desarrollo del plan operativo anual. Estos representan el 40% y 30%, respectivamente. Por lo cual es necesario que la Sección de Mecánica presente una matriz operativa en base a la organización y estructuración referente a sus procesos de mantenimiento, con la finalidad de tener una mayor disponibilidad de sus equipos y apoyar a la Dirección Administrativa, la Dirección Financiera y la Dirección de Infraestructura Vial, Construcciones, Riesgos y Vivienda Rural, para de esta manera contribuir al logro de los objetivos institucionales.

Figura 1  
Equipo caminero disponible al año 2017



Fuente: los autores

Para caracterizar el estado de las unidades al año 2017, se toma como referencia su año de fabricación frente a la vida útil de la unidad, la cual es considerada un tiempo estimado de 10 años, según los autores corporativos @Gerencie.com (2013) y Más Maquinaria y Construcción (2013). De acuerdo a esto se genera la siguiente tabla:

Tabla 1  
Ponderación del estado según el año de fabricación

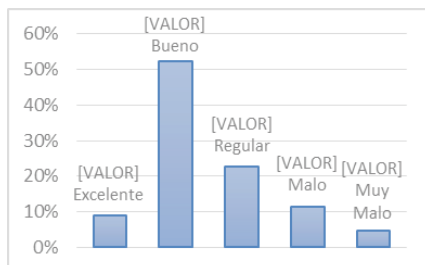
Año de fabricación	Estado del vehículo	Ponderación porcentual
2016 en adelante	Excelente	90% - 100%
2007 - 2015	Bueno	70% - 89%
2000 - 2006	Regular	50% - 69%
1990 - 1999	Malo	20% - 49%
1990 - atrás	Muy malo	5% - 19%

Fuente: los autores

Los equipos que se encuentran en estado de reparación no poseen un tiempo establecido de mantenimiento, ya que depende de la tramitación administrativa y financiera para la asignación de recursos económicos. En base a los parámetros del año de fabricación y verificación de la condición actual por parte de los técnicos, se realiza una pon-

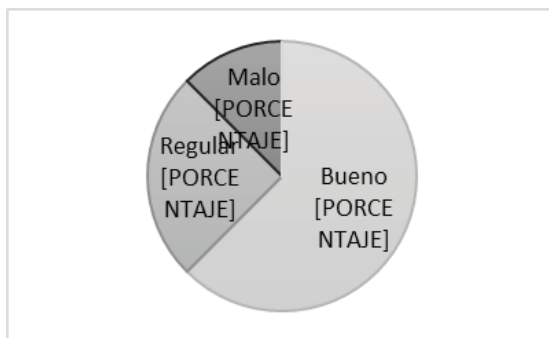
deración porcentualmente del estado actual de la maquinaria pesada y vehículos de carga pesada, expuesta en las figuras 2 y 3 respectivamente.

**Figura 2**  
Condición de la maquinaria pesada al año 2017



Fuente: los autores

**Figura 3**  
Condición del equipo de carga pesada al año 2017



Fuente: los autores

### **Estructura organizacional**

Del organigrama entregado por la Unidad Administrativa de Talento Humano (2011), referente a la implementación y funcionamiento de la Sección de Mecánica, se puede constatar que cuenta con un jefe de sección, un auxiliar de apoyo y diez técnicos, mostrándose la siguiente

estructura y jerarquía de acuerdo a sus funciones como se observa en la siguiente figura:

Figura 4  
Estructuración de la Sección de Mecánica



Fuente: los autores

### *Análisis DAFO de la Sección de Mecánica*

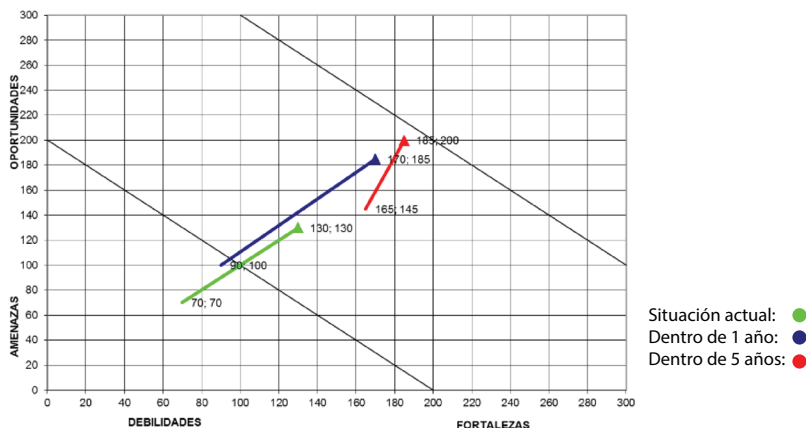
En base a los parámetros externos e internos de la unidad en estudio, y la aplicación de un análisis estadístico se obtienen vectores, que representan el funcionamiento actual y futuro de la Sección al implementar estrategias de control y gestionar sus procesos para la conservación del equipo caminero, el trazado se expone en la figura 5:

Se realiza un análisis estratégico mediante la matriz MAFE (matriz analítica de formación de estrategias) de Hershey Food Corporation citado en Ponce (2007); por medio de este método se interrelacionan los criterios definidos del análisis DAFO y se formulan las estrategias para dicha sección:

- Adquisición de servicios para diagnóstico predictivo del equipo caminero.
- Mejorar la prestación de los equipos mediante la inclusión de estrategias y operaciones modificativas.
- Implementación de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para el control de la gestión y la operación de mantenimiento.

- Aplicación de los procesos, procedimientos, y fichas elaboradas para las intervenciones de mantenimiento en el equipo caminero.
- Almacenamiento y control de los repuestos, materiales e insumos automotrices.
- Mejora del ambiente de trabajo mediante la inclusión de planes para el manejo y control de desechos peligrosos y chatarras.

Figura 5  
Análisis DAFO de la Sección de Mecánica



Fuente: los autores

### Formulación de procesos

En base a la información recopilada y procesada de la condición actual de la Sección de Mecánica, se procede a realizar la optimización e inclusión de procesos y estrategias para el control y conservación del equipo caminero; por lo cual se desarrolla un esquema general de los procesos estratégicos, operativos y de apoyo descritos en la tabla 2 según el autor Zaratiegui (1993) y adaptados a la unidad administrativa en la figura 6.

Tabla 2  
Ponderación del estado según el año de fabricación

Proceso	Descripción
Estratégicos	Destinado a definir y controlar los objetivos y estrategias, este proceso es administrado y gestionado por el nivel directivo.
Operativos	Permite llevar a cabo las acciones para desarrollar las políticas y estrategias definidas para la sección, con la finalidad de tener un adecuado mantenimiento del equipo caminero.
De apoyo o soporte	No están enlazados directamente con el desarrollo de las estrategias, pero influyen en el proceso operativo.

Nota: las categorías, se jerarquiza de acuerdo a la importancia del proceso y se clasifican en primarios o secundarios, los cuales se interrelacionan en secuencias ordenadas.

Fuente: los autores

Figura 6  
Esquema general del mapa de procesos de la Sección de Mecánica



Fuente: los autores

De acuerdo al esquema general se elaboran subprocesos a través de flujogramas, matrices y fichas, para tener un control y evaluación de las acciones rutinarias, preventivas o correctivas que se realicen sobre la unidad, considerando el cumplimiento del ciclo Demming (planificar,

hacer, verificar, actuar) (Maldonado, 2015) que permitan obtener resultados eficientes y viables. En base al esquema general y la ficha técnica presentadas en las figuras 6 y 7, respectivamente, se identifican las actividades de control para la evaluación de los equipos, y estas se representan en la figura 8, mediante un árbol de procesos y procedimientos.

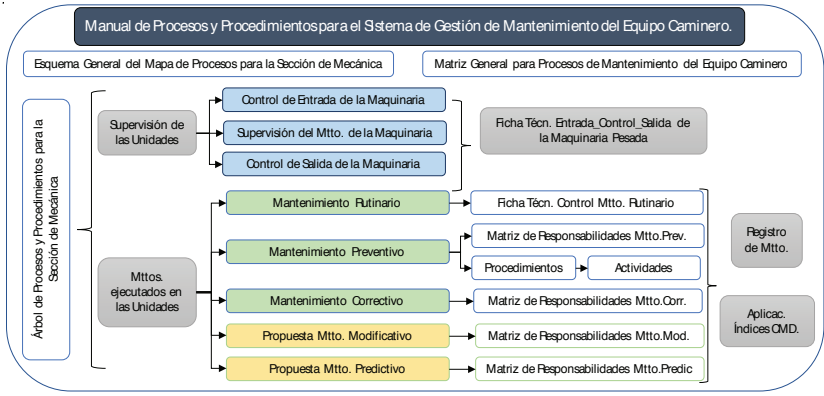
Figura 7  
Ficha de control del mantenimiento



Fuente: los autores



Figura 8  
Procesos, procedimientos y actividades de control del mantenimiento



Fuente: los autores

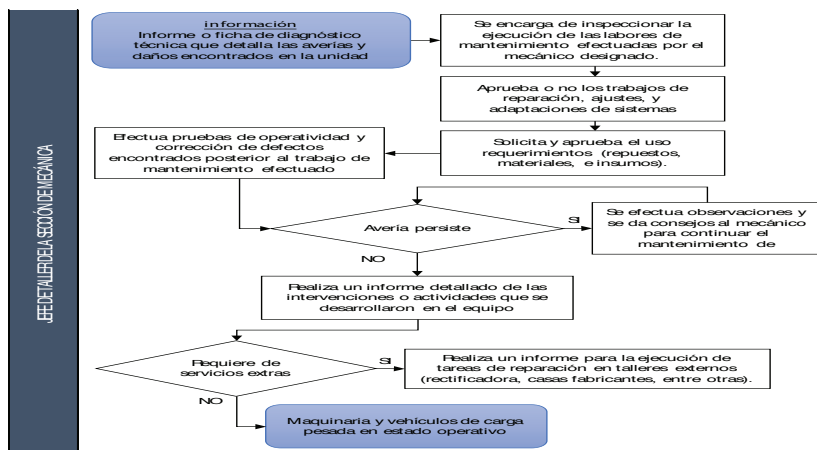
### *Proceso de supervisión de unidades*

Este proceso engloba tres procedimientos: entrada, supervisión y salida de la unidad del taller mecánico, los cuales son expuestos en las figuras 9, 10 y 11, respectivamente. Además, se disponen de fichas técnicas que facultan una inspección y evaluación diagnóstica de la máquina que solicite el proceso de mantenimiento. En la figura 17 se ejemplifica un tipo de ficha.

Para estas actividades de control es necesario registrar los siguientes parámetros:

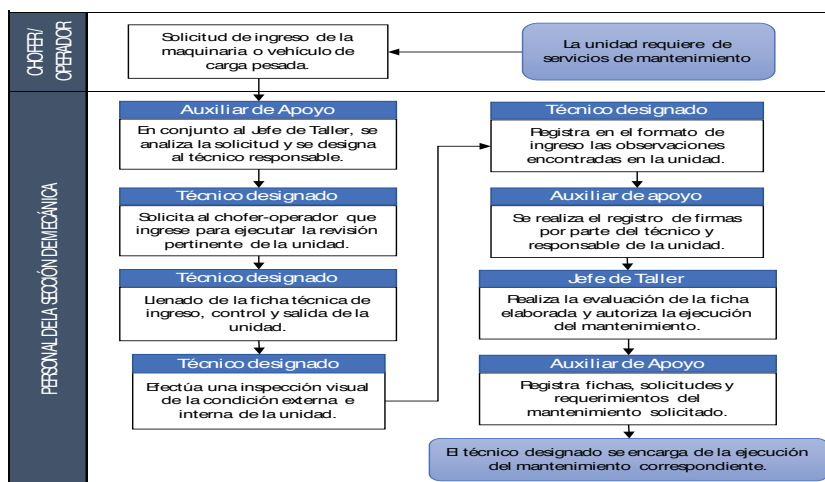
- Descripción del equipo
- Datos del funcionario responsable del equipo y mantenimiento
- Control del combustible y hodómetro o kilometraje
- Hora de ingreso/salida de la unidad
- Revisión de accesorios y documentos

Figura 9  
Supervisión de las tareas de mantenimiento



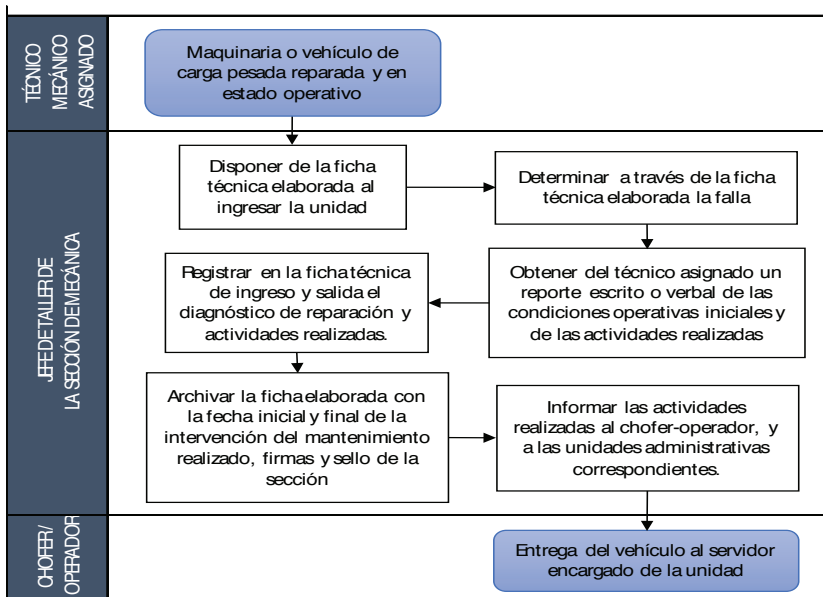
Fuente: los autores

Figura 10  
Proceso de entrada de la unidad



Fuente: los autores

Figura 11  
Proceso de salida de la unidad



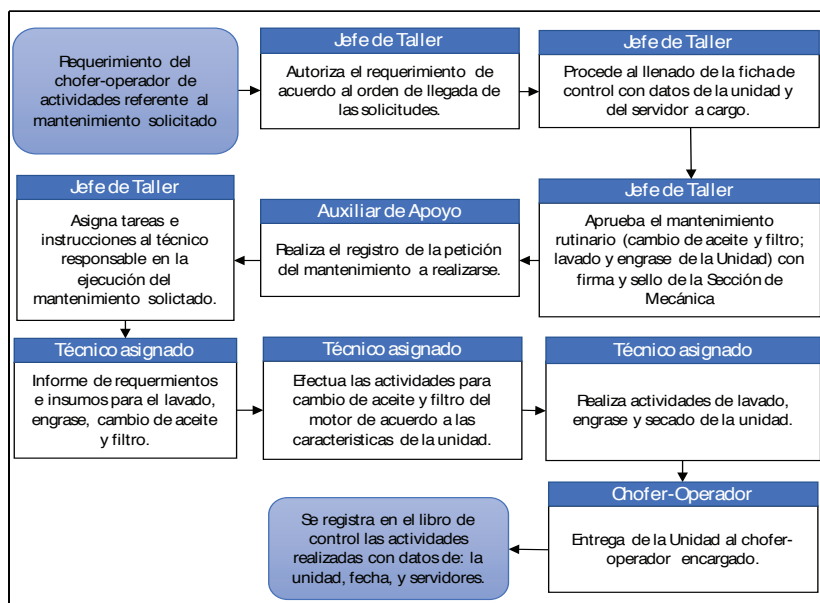
Fuente: los autores

### *Procesos de mantenimiento*

**Mantenimiento rutinario.** Se realizan generalmente actividades de lavado, secado y lubricación de la maquinaria. Generalmente es realizado por el personal encargado de lubricación y lavado de las unidades, ya que estos disponen de los insumos requeridos para este tipo servicio. El proceso a seguir se expone en la figura 12.

Las estrategias de mantenimiento formuladas buscan sostener o alargar la vida útil de los equipos que dispone la entidad, aportando de manera directa al desarrollo de obras de vialidad e infraestructura.

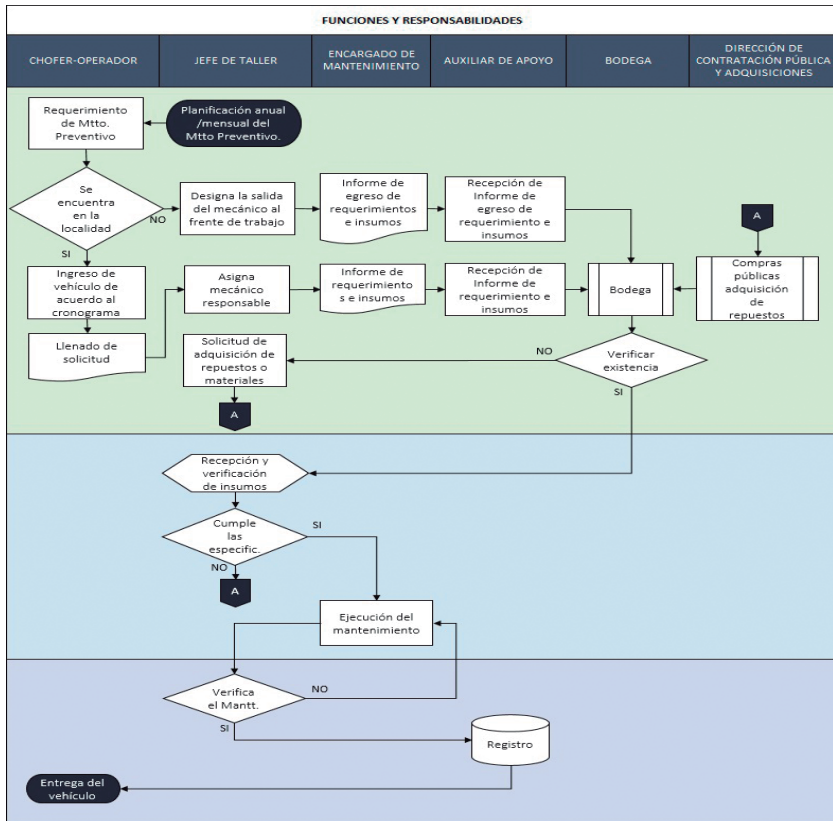
Figura 12  
Proceso de mantenimiento rutinario



Fuente: los autores

*Mantenimiento preventivo.* Se describen estrategias para reducir la probabilidad de ocurrencia del fallo, las operaciones a realizarse dependerán del tipo de máquina y el tiempo de operación en el que se encuentra. Al establecer esta estrategia de mantenimiento planificado se obtiene varios beneficios: faculta a planificar las actividades, los requerimientos e insumos, recursos humanos, materiales y económicos; permitiendo minimizar el tiempo de intervención y facultando reducir los costos ocasionados por el fallo del equipo, puesto que se enfoca en evitar la ocurrencia de estos eventos. Además, la seguridad de los operadores de los vehículos se ve incrementada al reducir la ocurrencia del fallo. El proceso a seguir para las acciones preventivas se presenta en la siguiente figura:

Figura 13  
Proceso para el mantenimiento preventivo



Fuente: los autores

A continuación, se formulan los procedimientos de acuerdo a ejemplos presentados por la entidad del Ministerio de Trabajo (2015), para las acciones preventivas de las unidades, el cual incluye: entradas, servicios, beneficiarios, actividades, tareas, frecuencia, número de servicios, tiempo de ejecución del servicio, recursos humanos y físicos e interfaz; todos representados en la siguiente figura:

Figura 14  
Ficha de levantamiento de procedimiento preventivo  
de la maquinaria pesada

Entradas	Servicios Beneficiario	Actividades	Tareas para la actividad	Frecuencia	Volumen # de Servicios	Tiempo de ejecución (min) por servicio prestado			Recursos Humanos	Recursos Físico	Interfaz
						Tiempo mínimo	Tiempo Promedio	Tiempo Máximo			
Planificación anual del mantenimiento		Ejecución del Mantenimiento Preventivo para la Maquinaria Pesada	Mantenimiento cada 250 Horas	Diario Ordinario	3	270	420	570	Técnico de la Sección de Repuestos, materiales e Insumos de Mecánica		Sección de Mecánica, Bodega, Dirección Administrativa
			Mantenimiento cada 500 Horas		3	15	30	45			
			Mantenimiento cada 1000 Horas		3	135	195	255			
			Mantenimiento cada 2000 Horas		3	255	337.5	420			
Recepción de solicitudes, requerimientos, orden de trabajo, y otros Caminero	Seniador Público Preventivo encargado de la unidad, comunidades beneficiadas	Planificación de parámetros para la ejecución del Mantenimiento	Realiza la planificación preventiva mensual/anual para cada unidad	Diario Ordinario	1	60	90	120	Jefe de Taller	Equipo Informático	Direcciones y Secciones Institucional
			Sumilla y autoriza la ejecución del mantenimiento		5	10	20	30			
			Informe de asignación de un técnico responsable		5	10	20	30			
			Elaboración de solicitud para la adquisición de repuestos		2	15	21.5	30			
			Recepción y verificación de insumos		1	15	30	45			
			Verificación de las tareas de mantenimiento preventivas		3	60	80	100			
			Clasifica y revisa la documentación		10	60	90	120			
Información de localización de la maquinaria		Ingreso de documentación interna y externa	Registro de documentos, mtos, entre otros	Diario Ordinario	10	60	75	90	Auxiliar de Apoyo	Equipo Informático	Direcciones y Secciones Institucional
			Reconocimiento de información		5	15	21.5	30			
			Elaboración de informes de requerimientos		10	30	45	60			
			Registro de los repuestos, insumos y materiales utilizados		5	30	45	60			

Fuente: los autores

En la figura 15 se describen las actividades a realizar acorde al recorrido de la unidad en horas o kilómetros, además, se incluyen recursos físicos y humanos, y se establecen tiempos de intervención de acuerdo a su grado de complejidad. Las actividades expuestas aplican para un tractor de orugas obtenido del manual de Komatsu Europe (2012).

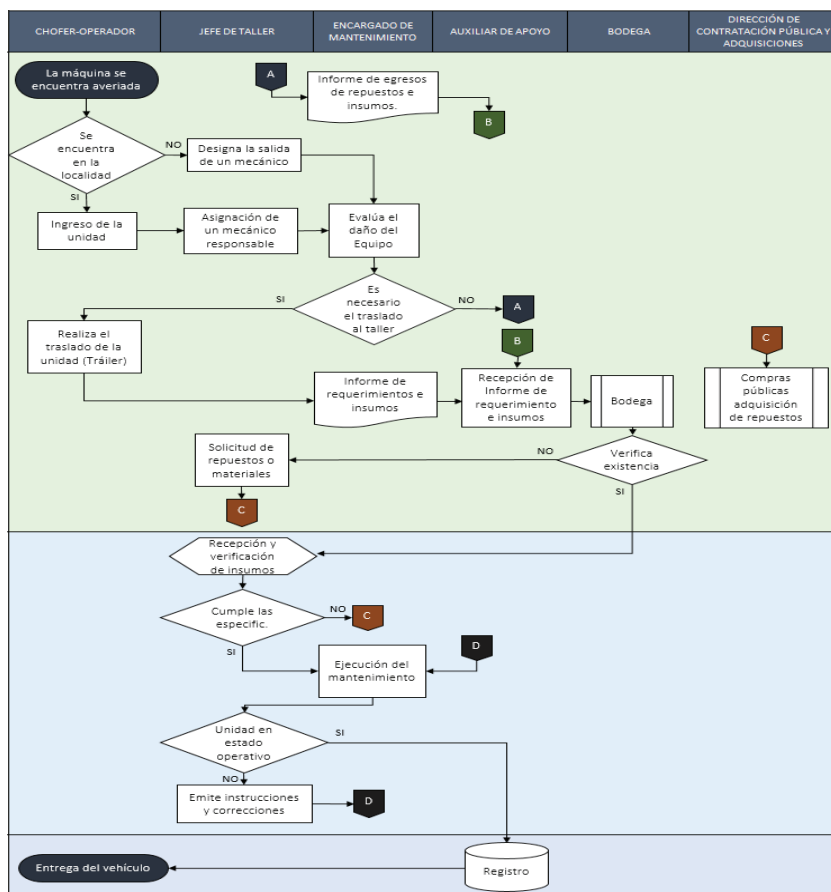
**Figura 15**  
**Acciones preventivas para el tractor**

Frecuencia del Mito.	Tareas para la actividad	Tiempo de ejecución (min) por servicio prestado			Recursos Humanos	Recursos Físico
		Tiempo Mínimo	Tiempo Promedio	Tiempo Máximo		
Mito. 250-Horas	Lubricación	60	90	120	Lavadores	Bomba para engrase
	Revisión del nivel del electrolito de la batería	15	30	45	Técnico Eléctrico	Densímetro, agua destilada
	Revisión del funcionamiento de los frenos	30	45	60	Vulcanizador	Líquido de Frenos
	Revisión del nivel de aceite de la caja de mando final. Agregado de aceite.	30	45	60	Técnico Mecánico	Acetate de caja
	Revisión del nivel y agregado de acetate en el tanque hidráulico.	15	30	45		Acetate hidráulico
	Revisión y limpieza del colador de combustible	30	45	60		Spray de limpieza
	Cambio de acetate del motor, reemplazo del filtro de acetate	30	45	60		Acetate de motor y filtro de acetate
	Limpieza del filtro del aire acondicionado	60	90	120		Aire comprimido
Mito. 500-Horas	Reemplazo del cartucho del filtro de combustible	15	30	45	Técnico Mecánico	Filtro de combustible
Mito. 1000-Horas	Cambio del acetate de la caja de la transmisión, limpieza del colador en en tren de fuerza	30	45	60	Técnico Mecánico	Acetate de transmisión
	Reemplazo del cartucho de filtro de acetate de la transmisión	30	45	60		Cartucho de filtro y empaque
	Limpieza del respiradero	30	37.5	45		Diesel o Spray de Limpieza
	Cambio del acetate de la caja del embrague de giro	15	22.5	30		Acetate de caja
	Engrase de la unión universal	30	45	60	Lavadores	Grasa y Bomba de engrase
Mito. 2000-Horas	Cambio de acetate del tanque hidráulico, reemplazo del elemento del filtro de acetate	60	75	90	Técnico Mecánico	Acetate, filtro de acetate.
	Cambio de acetate en la caja de mando final	30	45	60		Acetate para Transmisión
	Revisión del amortiguador de vibración	30	37.5	45		Silicon, franela
	Revisión de la holgura de válvulas del motor	45	52.5	60		Visual
	Agregado de agente anticorrosivo al sistema de enfriamiento	30	37.5	45		Refrigerante
	Revisión del motor de arranque y del alternador	60	90	120	Técnico Eléctrico	Escobillas y limpiador de contactos

Fuente: los autores

*Mantenimiento correctivo.* Por medio de diagramas de flujo se colocan las actividades de forma secuencial y ordenada, con el propósito de que el proceso sea desarrollado de una forma ágil y óptima, permitiendo restablecer el equipo caminero a su estado operativo habitual de servicio. El proceso a seguir se expone en la siguiente figura:

Figura 16  
Proceso del mantenimiento correctivo



Fuente: los autores



A continuación, en la figura 17, se realiza un registro para el control de las acciones preventivas o correctivas que se realicen sobre la unidad.

**Figura 17**  
**Ficha para el control de acciones preventivas y correctivas**

Información de ingreso del vehículo		Información de salida del vehículo	
Kilometraje/Horómetro:	<input type="text"/>	Kilometraje/Horómetro:	<input type="text"/>
Combustible:	<input type="text"/> E <input type="text"/> F	Combustible:	<input type="text"/> E <input type="text"/> F

ESPECIALIDAD				TIEMPO		DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS EJECUTADOS
Mecánico	Eléctrico	Suelda	Vulcaniz	Estimad	Real	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

REPUESTOS / ACCESORIOS / EMPLEADOS	
Pedido No. / Fecha:	<input type="text"/> / <input type="text"/>
Egreso Bodega No. / Fecha:	<input type="text"/> / <input type="text"/>
Fecha de recepción de Repuestos / Accesorios	<input type="text"/>

OBSERVACIONES
<input type="text"/>

Fuente: los autores

La figura 18 muestra una matriz de asignación de responsabilidades. Esta tiene una correlación directa entre las actividades a desarrollar y los responsables, facultando la optimización del modelo de gestión, ya que presenta cada una de las tareas a ejecutar asociadas a un solo cargo, para de esta manera agilizar el proceso de mantenimiento y rendir cuentas por una tarea determinada. De igual manera se elabora para los procesos: rutinario, preventivo, modificativo y predictivo.

Figura 18  
Matriz RACI para el proceso de mantenimiento correctivo

PROCESO ACTUAL	FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES					
Actividad	CHOFER- OPERADOR	JEFE DE TALLER	ENCARGADO DE MANTENIMIENTO	AUXILIAR DE APOYO	BODEGA	DIRECCIÓN DE CONTRATACIÓN PÚBLICA Y ADQUISICIONES
Maquinaria Avería	R	C	I	I		
Asignación de un mecánico responsable	I	R	I	I		
Evaluación del daño	I	C	R			
Determina si es necesario el traslado al taller	I	C	R			
Traslado del equipo averiado (Camión Trailer)	R	C				
Informe de requerimientos e insumos		C	R	I	C	C
Recepción de Informe de requerimiento e insumos			I	R	C	C
Verifica la existencia de repuestos o materiales		C	I	I	R	I
Adquisición de repuestos		I			C	R
Recepción y verificación de insumos		R	C		I	I
Ejecución del mantenimiento		C	R			
Verificación del Mantenimiento	I	R	C	I		
Registro de los repuestos y materiales		C	C	R	I	I
R: Encargado C: Consultado I: Informado						

Fuente: los autores

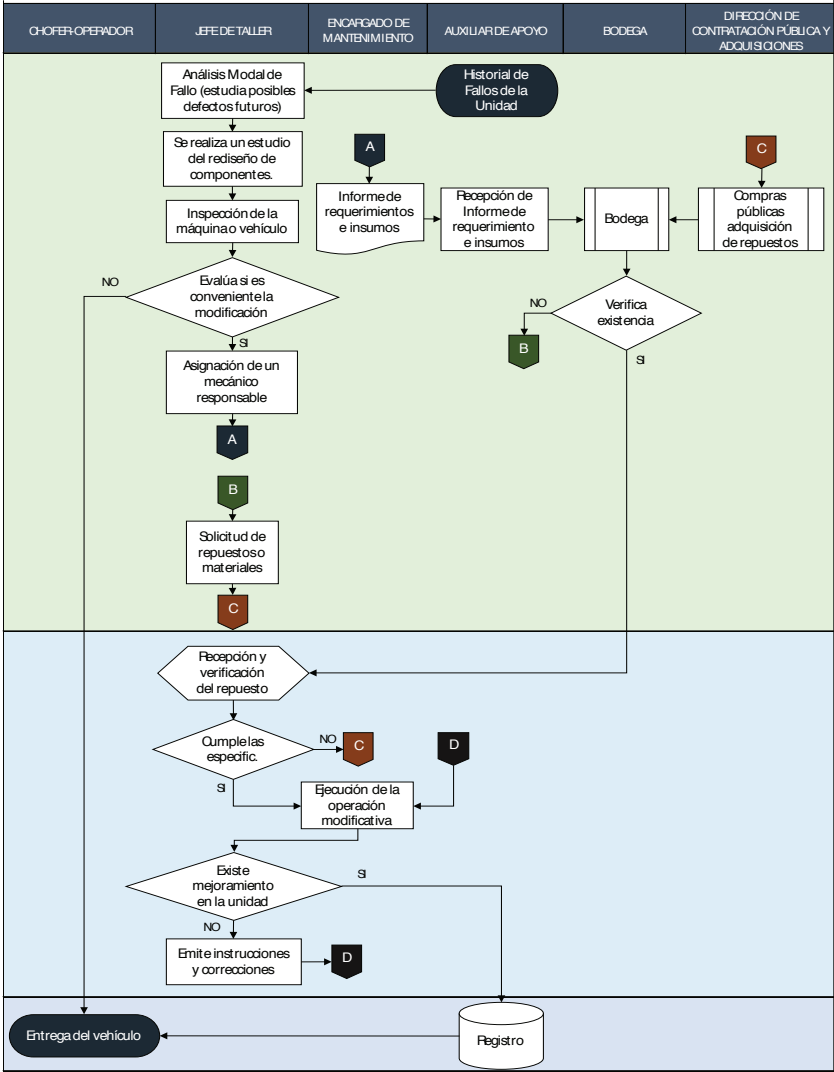
Además, se recomienda la inclusión del proceso predictivo o modificativo presentados en las figuras 19 y 20 respectivamente, estas estrategias mejoran el rendimiento actual en el sistema de gestión, ya que incorporan actividades de monitoreo que permiten controlar y predecir los indicadores de productividad o buscan mejorar las prestaciones del equipo en caso de acciones modificativas; estos mantenimientos ofrecen los siguientes beneficios:

- Mayor disponibilidad de la maquinaria
- Considerable aumento de fiabilidad y confiabilidad
- Menos recursos por paradas imprevistas
- Reducción de accidentes y aumento de seguridad
- Disminución en los gastos de repuestos e insumos
- Reducción en las intervenciones anuales de mantenimiento
- Aminora la mano de obra

Para el manejo de información se lleva a cabo una planificación de la condición operativa de cada unidad. El proceso a seguir se expone en la figura 21, el cual detalla los siguientes parámetros:

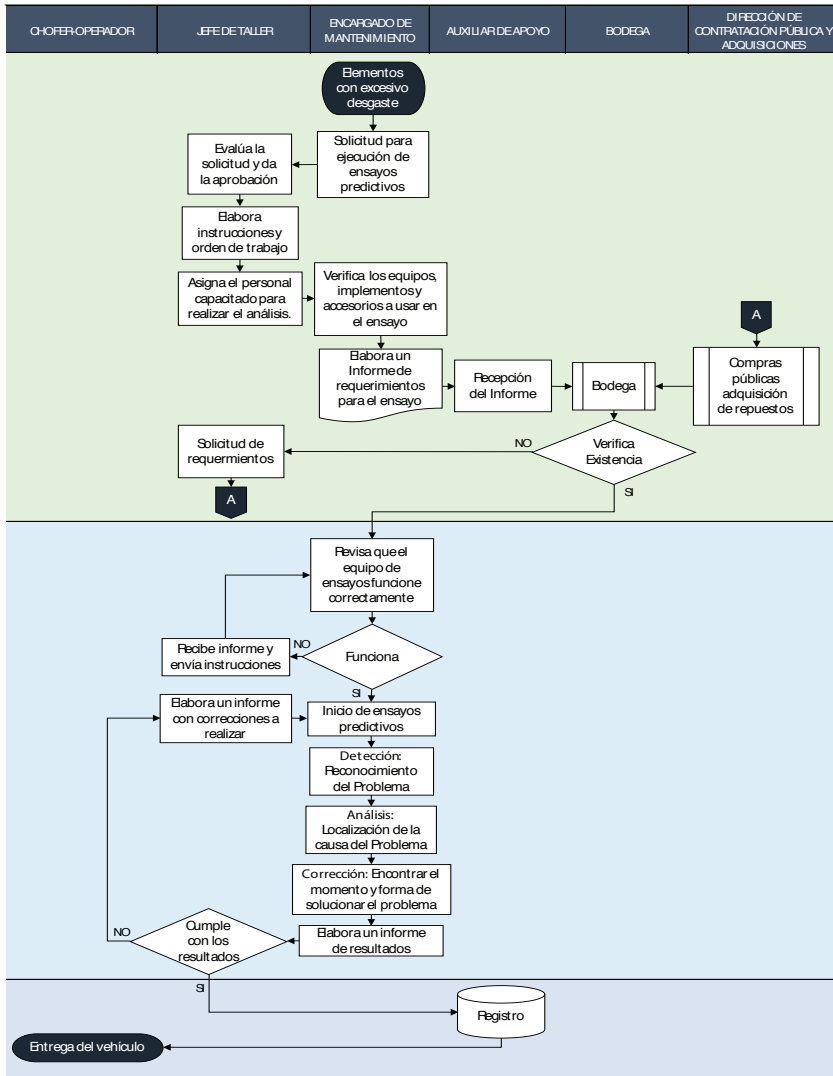
1. Levantamiento de información:
  - Fallo producido
  - Tiempo de intervención
2. Procesamiento de información:
  - Verificación y validación
  - Registro de intervenciones
  - Frecuencia de recopilación
  - Retención de registros
3. Interpretación de resultados:
  - Índices CMD, fichas técnicas, y diagrama de Pareto

Figura 19  
Proceso de mantenimiento modificativo



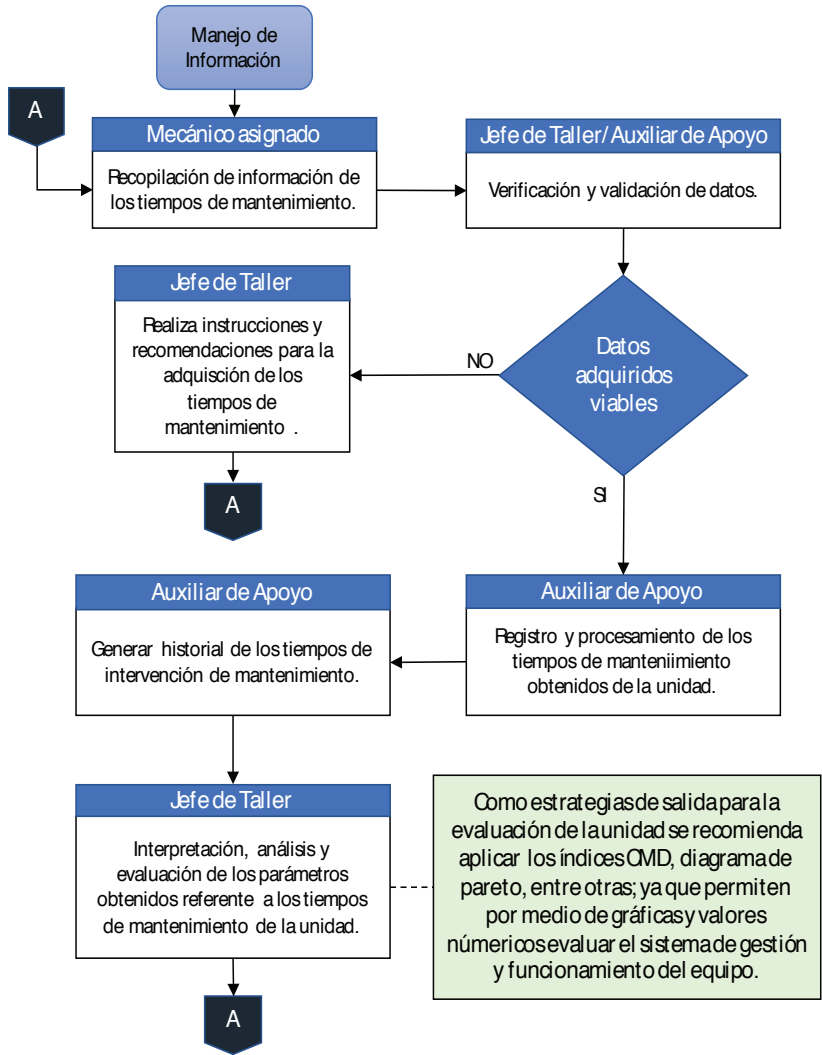
Fuente: los autores

Figura 20  
Proceso de mantenimiento predictivo



Fuente: los autores

Figura 21  
Proceso para el manejo de información



Fuente: los autores

## Análisis de resultados

Se obtiene a partir de ecuaciones matemáticas y probabilísticas curvas que caracterizan la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad operativa de la unidad. Esta estrategia de medición y evaluación faculta al sistema para mantener una mejora continua en la planificación y gestión de las operaciones de mantenimiento. El proceso a seguir para la medición y evaluación de los índices se presenta en la figura 22. Las ecuaciones que caracterizan la confiabilidad, probabilidad de fallas y tasa de fallas aplicadas a la distribución de Weibull para actividades de estimación sobre el equipo, son las siguientes según Céspedes y Toro (2001):

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^{\beta}} (t-\gamma)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta \cdot (t-\gamma)^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} \quad (3)$$

Donde:

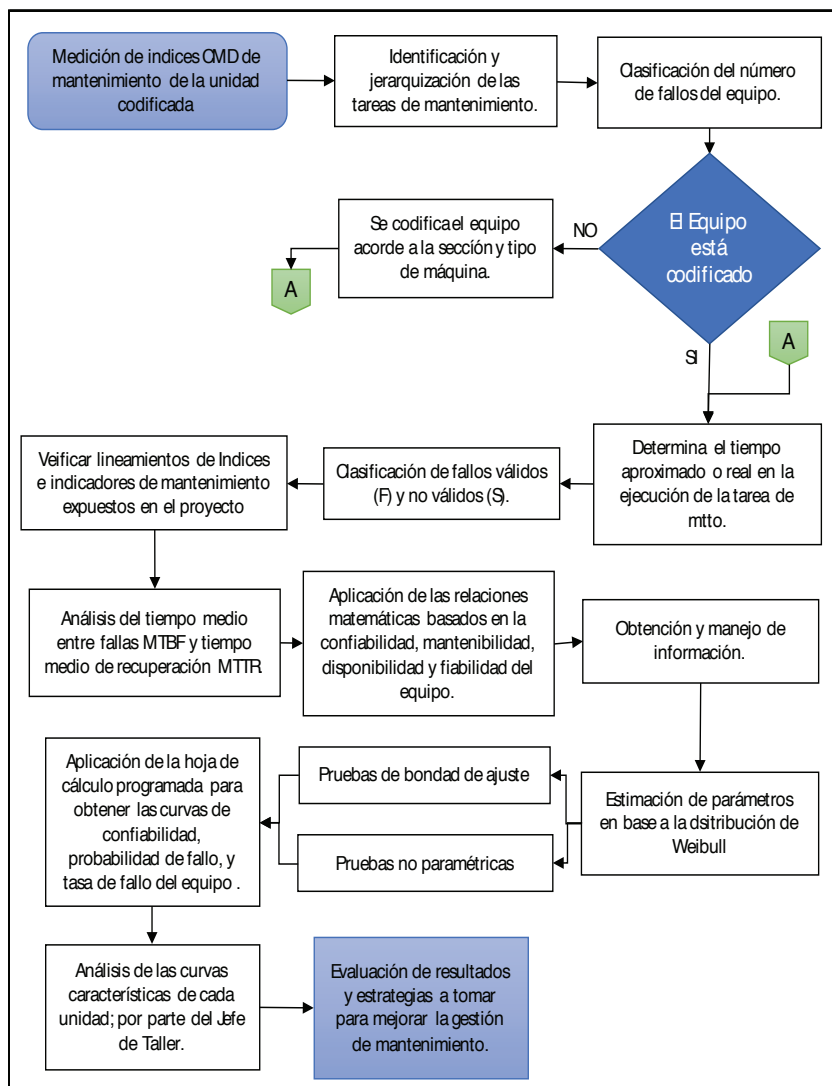
$\gamma$  = *parámetro de posición*

$\beta$  = *parámetro de forma*

$\eta$  = *parámetro de escala*

En la figura 23 se representan gráficas que estiman el comportamiento de un equipo obtenidas a partir del estudio realizado por Melo (*et al.*, 2009). En la figura 23 (a) se analiza la confiabilidad del sistema, en donde se observa que al transcurrir las horas de funcionamiento la curva decrece, esto se debe a un desgaste normal en los componentes del equipo. Esto concuerda con la figura 23 (b) y (c), ya que la mantenibilidad y la densidad de fallas presentan un incremento acorde al desgaste de los elementos del sistema o equipo.

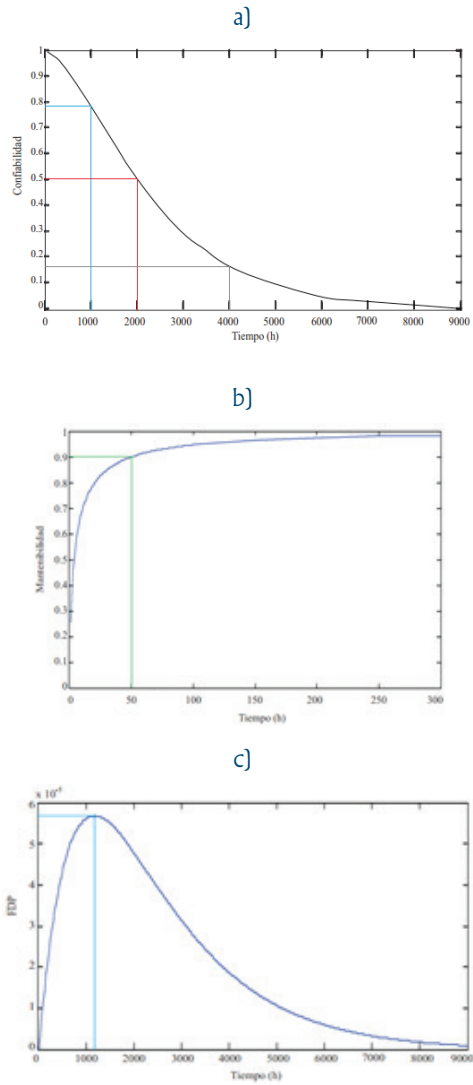
Figura 22  
Proceso de medición de los índices CMD



Fuente: los autores



Figura 23  
Descripción gráfica de los índices CMD



Fuente: Melo *et al.*, 2009

## Conclusiones

El estudio se centró en la maquinaria y vehículos de carga pesada que posee la entidad, ya que se consideran indispensables en el desarrollo del plan operativo anual, estos representan el 40% y 30% respectivamente. La metodología DAFO complementa el diagnóstico del sistema de gestión de mantenimiento, permitiendo realizar un análisis previo de los factores externos e internos que afectan o benefician a la sección en estudio. En base a la gráfica de vectores se determina que la gestión vigente opera aproximadamente con el 50% en la zona de riesgo, y el 50% restante en una zona viable. Además, esta herramienta de carácter técnico faculta a realizar una ponderación futura del funcionamiento de la unidad administrativa, en la cual se visualiza que, por medio de la aplicación e inclusión de estrategias, métodos, procedimientos y procesos, el sistema puede mejorar su rendimiento; de acuerdo a los vectores se predice que puede llegar a operar aproximadamente al 90% y 100% en la zona viable dentro de 1 año y 5 años respectivamente. La elaboración de esquemas, diagramas de flujo, actividades y estrategias permiten obtener un control adecuado y facultan a mantener en estado operativo la maquinaria, apoyando el cumplimiento de los trabajos planificados para el desarrollo integral de las comunidades rurales a través de obras de vialidad e infraestructura, que en muchos casos apoyan el desarrollo de actividades agropecuarias, comercio, transporte, turismo cultural y ecoturismo. En base a la aplicación de los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, los cuales se basan en principios estadísticos y probabilísticos faculta a la unidad administrativa a realizar una evaluación integral y específica en el control del equipo caminero. Esto permite al departamento a cargo de la maquinaria pesada planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar el sistema de gestión y operación de los mantenimientos, verificando el cumplimiento de metas y objetivos trazados por la Sección de Mecánica. Mediante la estructuración, optimización e inclusión de los índices CMD en el modelo vigente, se pretende obtener el 85% de disponibilidad de las unidades, apoyando de

manera directa a las secciones administrativas encargadas en el desarrollo integral de las comunidades.

## Referencias bibliográficas

- @Gerencie.com. (2013). *Vida útil de los activos fijos*. Recuperado de <https://www.gerencie.com/vida-util-de-los-activos-fijos.html>
- Ahuja, J. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, (25), 709.
- Carrasco, J. (2008). *Gestión de procesos (con responsabilidad social)*. Santiago de Chile: Evolución.
- Colín, L. (2002). *Las normas ISO 9000:2000 de sistemas de gestión de calidad*. Recuperado de <https://www.ineel.mx/bolISO02/tecni2.pdf>
- Komatsu Europe. (2012). *Manual de mantenimiento del bulldozer sobre orugas*. Madrid: KESA.
- Maldonado, J. (2015). *Gestión por procesos*. Madrid: Evolución.
- Más Maquinaria y Construcción. (2013). *Depreciación de activos “maquinaria y construcción”*. Recuperado de <http://masconstruccionymaquinaria.blogspot.com.co/2013/01/depreciacion-de-activos-maquinaria-y.html?m=1>
- Melo, R., Lara, C. y Gordillo, J. (2009). *Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería*. México: Científica Redalyc.
- Mesa, D., Sánchez y Pinzón, M. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas. *Scientia et Technical*, 12(122), 155.
- Ministerio de Trabajo. (2015). *Registro de información en la plantilla de talento humano y plan de optimización y racionalización*. Recuperado de [http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/Instructivo\\_Norma\\_Tecnica\\_Subsistema\\_Planificacion\\_TH.pdf](http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/Instructivo_Norma_Tecnica_Subsistema_Planificacion_TH.pdf)
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento: planeación, ejecución y control*. México: Alfaomega.
- Pérez, J. (2009). *Gestión por procesos*. Madrid: ESIC.
- Ponce, H. (2007). La matriz FODA: alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones. *Enseñanza e Investigación*, (12), 122.

- Toro, J. ; Cespedes, P. (2001). *Metodología para medir Confiabilidad Mantenibilidad y Disponibilidad en Mantenimiento*. Universidad EAFIT, Medellin-Colombia.
- Zaratiegui, J. (1993). La gestión por procesos: su papel e importancia en la empresa. *Economía Industrial*, (330), 88.



# Reducción de NO<sub>x</sub> de un motor CRDi mediante el control difuso de la válvula EGR

Wilmer Contreras<sup>1</sup>

Xavier Guamán<sup>2</sup>

Omar Sigüenza<sup>3</sup>

## Resumen

En este artículo se presenta el estudio de los efectos en las emisiones de óxido nítrico, mediante el control difuso de la válvula EGR. Para este fin se obtuvieron señales de sensores que tienen influencia en el funcionamiento del sistema EGR del motor Hyundai Santa Fe CRDi. Estas señales pasaron por procesos de filtrado digital con el fin de no presentar problemas en el instante de ser procesadas en el sistema difuso. Las señales obtenidas fueron consideradas como variables de entrada y salida para el diseño del sistema difuso, el cual consta de una etapa de fusificación, funciones de membresía, conjuntos difusos y defusificación. Para la variable de salida se aplicó un proceso de post-tratamiento, el cual comanda al solenoide de la válvula EGR. Una vez establecido el sistema difuso de control de la válvula EGR, se tomaron muestras de las emisiones del motor en diferentes condiciones de funcionamiento. Finalmente, se procedió a validar las diferencias de las medias de los resultados mediante un análisis estadístico.

## Palabras clave

Emisiones contaminantes, lógica difusa, LabView, recirculación de gases de escape, funciones de membresía, defusificación.

## Abstract

*This article presents the study of the effects on nitrous oxide emissions, through the diffuse control of the EGR valve. For this purpose, sensors were obtained that influence the operation of the EGR system of the Hyundai Santa Fe CRDi engine, these signals went through digital filtering processes, so that they do not present problems in the instant of being processed in the diffuse system. The obtained signals were considered as input and output variables for the diffuse system design, which consists of a fusing stage, membership functions, fuzzy sets and defuzzification, the output variable*

- 
- 1 Miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, máster en Sistemas Automotrices, docente de Motores de Combustión Interna UPS-Cuenca (rcontreras@ups.edu.ec).
  - 2 Ingeniero en Mecánica Automotriz por la Universidad Politécnica Salesiana.
  - 3 Ingeniero en Mecánica Automotriz por la Universidad Politécnica Salesiana.

*was additionally given a post treatment process, Before the system controls the solenoid valve EGR. Once the diffuse EGR valve control system was established, samples of the engine emissions were taken under different operating conditions. Finally, we validated the differences in the means of the results by means of a statistical analysis.*

**Keywords**

*Emissions, fuzzy logic, LabView, exhaust gas recirculation, membership functions, and defuzzyfication.*

## Introducción

La principal necesidad de un control en las emisiones de gases contaminantes en motores de encendido por compresión, nace desde la implementación de normativas ambientales a nivel mundial, las cuales año tras año han sido más rigurosas (Jiménez-Alonso *et al.*, 2009). Es preciso mencionar que los motores a diésel presentan ventajas como:

- Menor consumo
- Durabilidad
- Fiabilidad
- El par motor es comparativamente más constante
- Larga vida útil
- El combustible es relativamente económico
- Su robustez; entre otras

Cabe agregar que, a pesar de sus ventajas, este motor tiene dificultades en su control de emisiones NOx y partículas, lo que ha llevado al avance tecnológico en el desarrollo de los motores diésel (Cabrera, 2013). Ante esta situación de protección ambiental, es de una importancia considerable lograr reducir las emisiones de NOx. Para ello se han adoptado varias metodologías, como el control Commande Robuste d'Ordre Non Entier (CRONE), utilizado para adaptar la trayectoria del aire y la trayectoria del combustible del motor, el cual contó con tres variables de entrada: válvula de recirculación de gases de escape (EGR), turbina de geometría variable (VGT) y el inicio de la inyección (SOI); así como tres salidas: flujo de aire masivo (MAF), presión de refuerzo (Pboost) y nivel de NOx. Adicionalmente, usando la identificación del

sistema de dominio de frecuencia, dicho control fue robustecido, aunque no se pudo evitar el aumento de la cantidad de materia particular (PM) (Nelson-Gruel *et al.*, 2014).

Otro interesante trabajo sobre este propósito es el producido en el marco del Smart Control and Diagnosis for Economy and Clean Engine (SCODECE), que es un proyecto europeo de cooperación territorial financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), el cual desarrolló un controlador de tiempo real (RFLC) para el control VGT y EGR en un motor diésel de servicio pesado, donde el controlador de lógica difusa es capaz de hacer los ajustes necesarios para dos casos específicos: fugas de aire y deterioro de la eficiencia mecánica de la turbina, sin perder el par del motor ni producir un aumento excesivo de hollín y NO<sub>x</sub> (Cheng *et al.*, 2015).

En el año 2015 se presentó una técnica innovadora que tiene que ver con el uso de un algoritmo de control predictivo multi-modelo (MMPC) para regular la relación aire-combustible y la válvula EGR, intentando cumplir un equilibrio entre el consumo de combustible y la respuesta de par (Nademi *et al.*, 2015).

El estudio de la reducción de NO<sub>x</sub> ha sido desarrollado a partir de complejas metodologías como las antes mencionadas, hasta otras más sencillas como un experimento realizado sobre la EGR donde se utilizan diferentes cantidades de gases de escape a temperaturas parcialmente frías obtenidas gracias a un intercambiador de calor; allí se observó que con el aumento del caudal de estos gases, las emisiones de NO<sub>x</sub> disminuyeron al igual que el consumo específico de combustible (Deepan, 2013).

En general, las metodologías descritas para la reducción de NO<sub>x</sub> se basan en el sistema de control de la válvula EGR y es en este campo donde la lógica difusa permite establecer criterios de significado para manejar eficientemente este control.



## Materiales y métodos

Para realizar este trabajo se inició con la elaboración de una hoja de cálculo, adicionando valores de señales en voltios para el caso de los sensores CKP, AFS y APS, y en porcentaje para la señal de activación del solenoide de la válvula EGR. Estos valores se clasificaron de acuerdo al orden de porcentaje de variación de la señal de activación del solenoide de la válvula EGR. Las muestras fueron tomadas con un vehículo que cumple las mismas características con las que cuenta el banco didáctico. Con el propósito de obtener valores en condiciones reales de manejo, dichas fueron tomando en las siguientes condiciones:

- Plano
- Subida (pendiente 2% - 5%)
- Bajada (pendiente 2% - 5%)

Los valores fueron obtenidos con el uso de una tarjeta DAQ NI USB 6212 y LabView, generando automáticamente una base de datos a ser ingresados en la hoja de cálculo. En las siguientes figuras se pueden observar las características de los equipos mencionados:

Figura 1  
Banco didáctico CRDI Diésel

	<p>Nombre del equipo: CRDI Diésel, ENG, A/T, Control System Educational training Equipment. Motor: FO D-2.0 CRDI. Cilindrada: 1991 cc. PS o Hp: 110.5 PS/4 000 rpm Torque: 26.0 kg*m/2 000 rpm Diámetro del cilindro por carrera (mm): 83x92</p>
---	--

Figura 2  
Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212

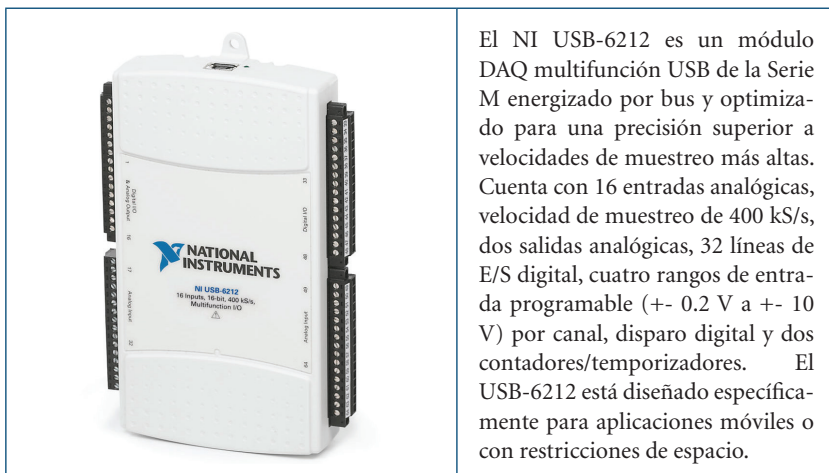


Figura 3  
Equipo analizador de gases MAHA MGT5

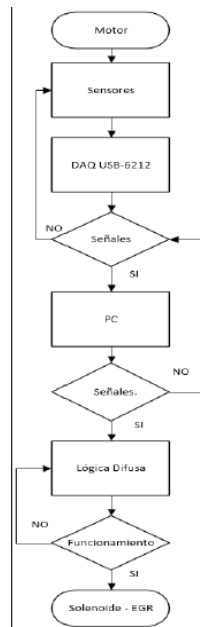


Fuente: los autores

El marco metodológico para la realización de este trabajo se lo puede observar en la figura 4, en la cual se parte por la revisión del estado del motor, específicamente hasta que este llegue a la temperatura de

trabajo que es 85° C, luego se verifica la conexión de los sensores hacia la tarjeta DAQ USB-6212, seguidamente se comprueba que las señales de los sensores sean las correctas en la PC; estas señales se preparan y filtran para luego ser procesadas por el algoritmo de lógica difusa y realizar el control del solenoide de activación de la válvula EGR.

**Figura 4**  
Flujograma secuencial de la implementación  
del control difuso de la válvula EGR



Fuente: los autores

### *Diseño del sistema difuso*

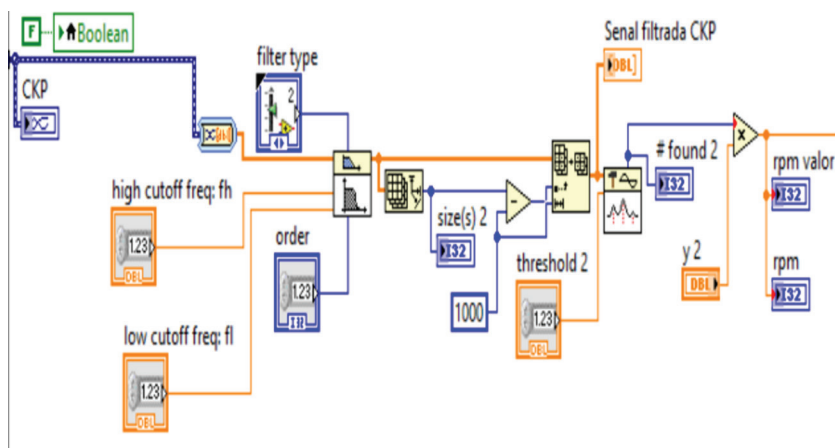
El sistema difuso a ser diseñado e implementado en el control de la válvula EGR es un sistema de control de lazo abierto, ya que el sistema no cuenta con un sensor NOx que retroalimente con valores

de emisiones de óxido nitroso. Se toma en cuenta que un controlador difuso no necesita explícitamente del modelo del proceso a controlar, lo cual presenta la ventaja de que el sistema difuso provee una eficiente y efectiva metodología para el desarrollo experimental de un controlador no lineal.

Las señales a ser procesadas son las señales de los tres sensores implicados en el funcionamiento de la válvula EGR: CKP, APS y AFS. La señal obtenida del solenoide de la válvula EGR establece los valores de apertura de la válvula, por lo que se le considera en el sistema como señal de salida o activación.

Debido a que la variable de entrada del sensor CKP para el sistema difuso se la considera en rpm, se utiliza el VI mostrado en la figura 5 como un convertor de la señal del sensor CKP en revoluciones por minuto (rpm).

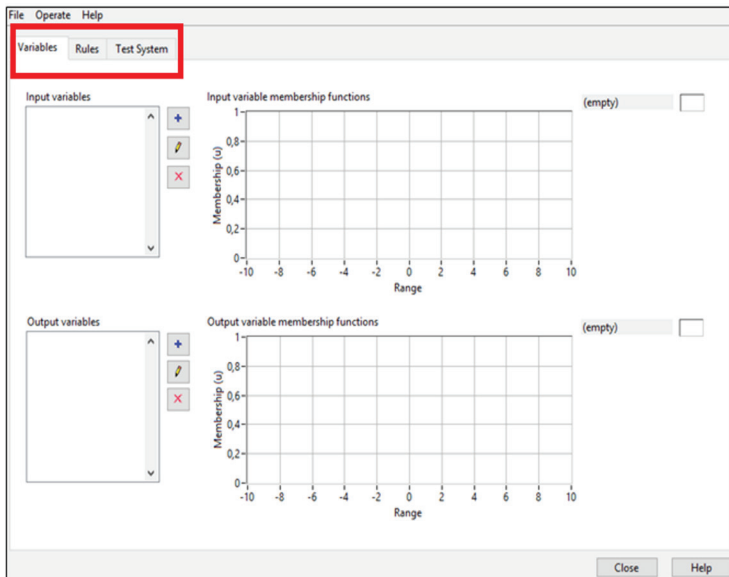
Figura 5  
Programa convertor de la señal  
del sensor CKP a rpm (VI)



Fuente: los autores

El diseño del sistema difuso se desarrolla en el software de instrumentación virtual LabView, con el uso de la herramienta Fuzzy System Designer (figura 6), el cual facilita establecer y modificar los diferentes niveles de estructura de un sistema difuso.

Figura 6  
Fuzzy System Designer (LabView)



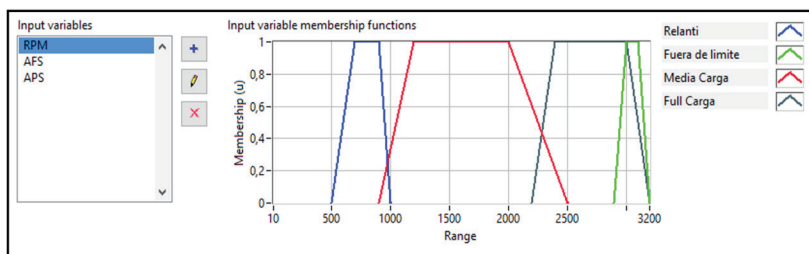
Fuente: los autores

## Valores de entrada, salida y funciones de membresía

Previo a la designación de funciones de membresía a los valores de entrada, se determina la forma de la función de membresía. Para el presente diseño se designa una forma “trapezoidal” debido a que se requiere que el sistema se active de manera estable en un determinado rango de valores y en combinación con otras funciones de membresía. Los valores de entrada como sus funciones de membresía para el sis-

tema difuso son: rpm 0 hasta 3 200 revoluciones por minuto. Para el límite máximo de revoluciones se toma en cuenta el valor establecido por el fabricante. Sus funciones de membresía son cuatro: ralentí, fuera de límite, media carga y full carga:

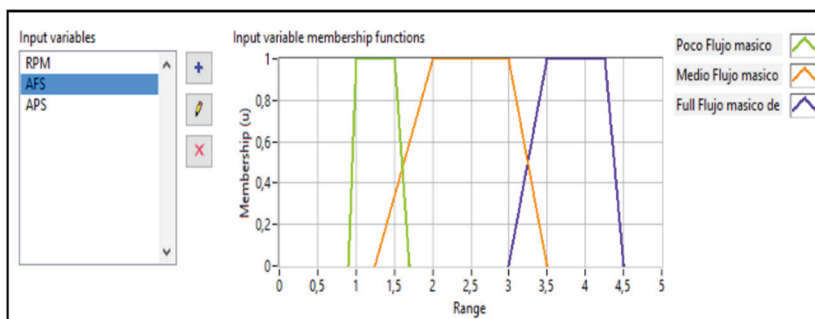
Figura 7  
Funciones de membresía de entrada (rpm)



Fuente: los autores

AFS: 0 hasta 5 voltios ya que es el rango de funcionamiento del sensor. Sus funciones de membresía son tres: poco flujo másico de aire, medio flujo másico de aire, máximo flujo másico de aire:

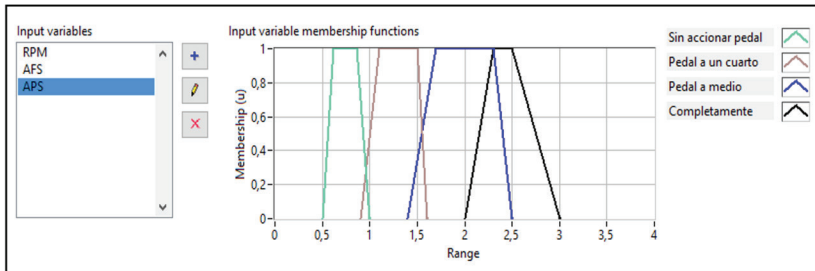
Figura 8  
Funciones de membresía de entrada (AFS)



Fuente: los autores

APS: de 0 a 4 voltios ya que es el rango de funcionamiento del sensor. Sus funciones de membresía son cuatro: sin accionar el pedal, pedal a un cuarto, pedal a medio, completamente accionado:

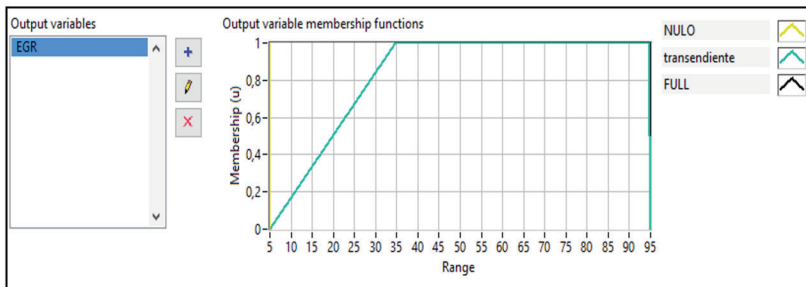
Figura 9  
Funciones de membresía de entrada (APS)



Fuente: los autores

La función de membresía de los valores de salida para la activación del solenoide de la válvula EGR (figura 10), se lo designa desde un porcentaje de apertura del 5% al 95%, de tal forma que la activación sea progresiva.

Figura 10  
Función de membresía de salida (EGR)



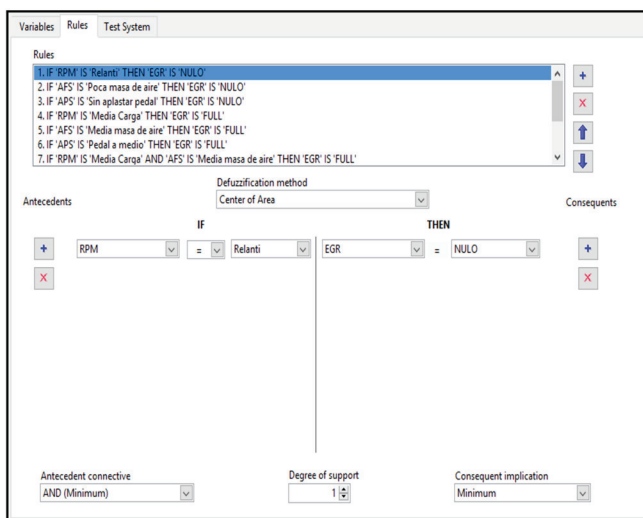
Fuente: los autores

## Reglas

Se debe considerar que, entre más reglas, el sistema tiende a necesitar más tiempo para procesar el sistema difuso por lo que depende de la capacidad de proceso del ordenador el tener una respuesta rápida o no. Entonces lo deseado es realizar un sistema lo más eficaz posible y poder obtener los resultados deseados.

Para el sistema de la EGR se ha establecido 10 reglas básicas (figura 11), las cuales definen el funcionamiento del solenoide de la válvula EGR, cada regla es específica y no es contradictoria con ninguna otra.

Figura 11  
Designación de reglas mediante LabView



Fuente: los autores

Las reglas designadas son:

1. Si “RPM” es “Ralenti” entonces “EGR” es “NULO”
2. Si “AFS” es “Poca masa de aire” entonces “EGR” es “NULO”



3. Si “APS” es “Sin aplastar pedal” entonces “EGR” es “NULO”
4. Si “RPM” es “Media carga” entonces “EGR” es “FULL”
5. Si “AFS” es “Media masa de aire” entonces “EGR” es “FULL”
6. Si “APS” es “Pedal a medio” entonces “EGR” es “FULL”
7. Si “RPM” es “Media carga” y “AFS” es “Media masa de aire” entonces “EGR” es “FULL”
8. Si “RPM” es “Ralenti” y “APS” es “Sin aplastar pedal” entonces “EGR” es “NULO”
9. Si “APS” es “Sin aplastar pedal” entonces “EGR” es “NULO”
10. Si “RPM” es “Full carga” entonces “EGR” es “NULO”

### *Desfusificación*

Para obtener una variable solución no difusa, se selecciona uno de los varios métodos para la conversión del conjunto difuso de salida. Los métodos de desfusificación que presenta el programa son:

- Centro de área modificado
- Centro de área
- Centro de sumas
- Centro de máximos
- Media de máximos

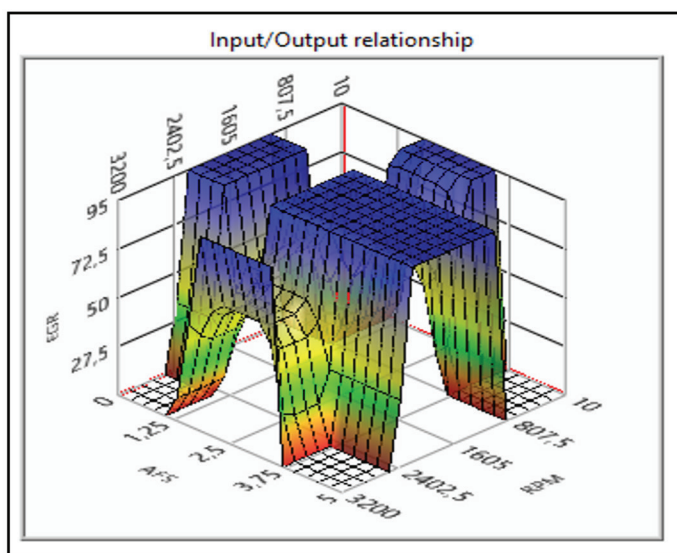
Debido a que los centros de sumas, centro de máximos y media de máximos no son exactos u ópticos, debido a que los puntos máximos pueden ser alcanzados por otros, se elige el método de centro de área como el método de desfusificación para el sistema difuso a ser implementado en el motor.

La principal ventaja del método de centro de área es que no representa un gasto computacional debido a que se han establecido tanto en las entradas como en las salidas conjuntos difusos trapezoidales, por lo que el cálculo de centro de áreas es procesado por el programa de manera instantánea.

## Prueba del sistema

La gráfica de superficie que se visualiza en la figura 12, establece la relación de las variables de entrada con la variable de salida, de acuerdo a las variaciones que se introduzcan al sistema, esta gráfica deberá cambiar su forma, determinando así que el sistema difuso diseñado esta relacionando las tres variables de entrada y dando una variable de salida.

Figura 12  
Test de relación de variables de entrada y salida  
en el sistema difuso diseñado



Fuente: los autores

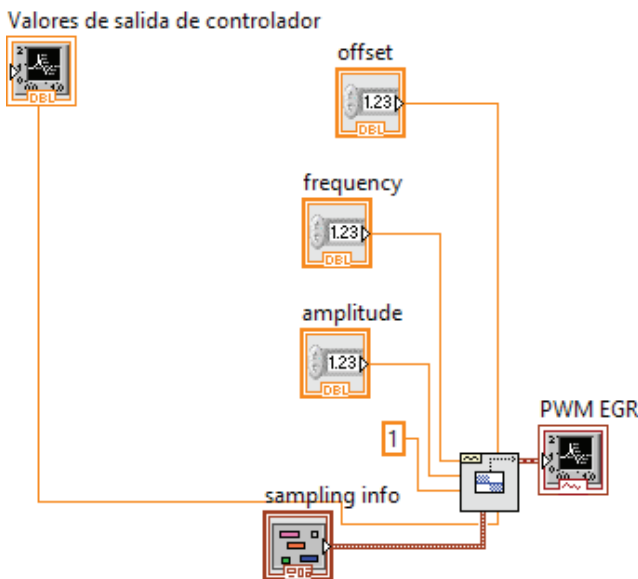
## Post-tratamiento de la variable de salida

Debido a que el sistema responde a los valores de entrada con valores de salida en porcentajes de apertura de la válvula EGR, se utiliza un

instrumento virtual generador de pulsos el cual genera una señal PWM de salida, la cual varía su amplitud de acuerdo a los porcentajes de salida que envía el sistema difuso.

La figura 13 muestra el VI creado, en el que los valores “Offset”, “Frequency” y “Amplitude” están en modo *default*. Una vez que la señal es procesada por este VI, se le designa un puerto de salida digital analógica en la tarjeta DAQ NI USB 6212, para que finalmente se conecte con el solenoide de activación de la válvula EGR.

Figura 13  
VI completo PWM



Fuente: los autores

### Implementación del sistema difuso en el motor

Al completar el diseño del controlador difuso, se procede a implementar este controlador en un motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0

Diésel. Para lo cual se realizan conexiones en los puertos de entrada de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212, las señales de los tres sensores que influyen en el funcionamiento de la válvula EGR; se desconectan los pines que reciben la señal para activar el solenoide de la válvula EGR, para conectarlos con la señal (PWM) en el puerto de salida de la tarjeta DAQ NI USB 6212.

Realizadas todas las conexiones, se procede a verificar el funcionamiento del sistema, para lo cual, con el uso de un osciloscopio, se verifica que los pulsos de activación del solenoide de la válvula EGR estén variando y para verificar que el solenoide se esté activando, se desconecta la cañería de entrada de vacío de aire de la válvula EGR y se conecta un vacuómetro, en el cual se observa la variación de depresión generada por la activación del solenoide de la válvula EGR:

Figura 14  
Variación de vacío por acción del solenoide  
de la válvula EGR controlado por un sistema difuso



Fuente: los autores

### *Etapas de potencia*

Debido a que el solenoide de la válvula EGR trabaja con 12 V y la salida de voltaje máxima de la tarjeta DAQ NI USB-6212 es de 10 V, se implementa un circuito eléctrico que acondiciona la señal de salida de la DAQ, con el uso de un módulo de encendido para aumentar el voltaje de salida de dicha tarjeta.

### *Medición de emisiones de óxido nitroso*

Los valores de emisiones de óxido nitroso se han obtenido siguiendo los pasos establecidos por las normas técnicas ecuatorianas NTE INEN 2203 para el motor en condiciones de ralentí y la normativa NTE INEN 2202 para el motor en condiciones de aceleración libre.

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1, en la cual los valores de NO<sub>x</sub> están en partículas por millón, también se establece el porcentaje de variación que existe entre las emisiones del motor en condiciones normales con los valores de las emisiones al aplicar el sistema de control difuso al controlador de la válvula EGR.

Tabla 1  
Tabla de porcentajes de variación  
de emisiones de óxido nitroso

rpm	Emisiones n° (ppm), motor en condiciones normales	Emisiones n° (ppm), motor con un controlador difuso	Porcentaje (%) de variación
850	72	23	68,05
1 000	57,95	12,89	77,75
1 500	43,14	15,57	63,90
2 000	33,96	6,53	80,77
2 200	23,2	2,59	88,83
		Promedio:	75,86

Fuente: los autores

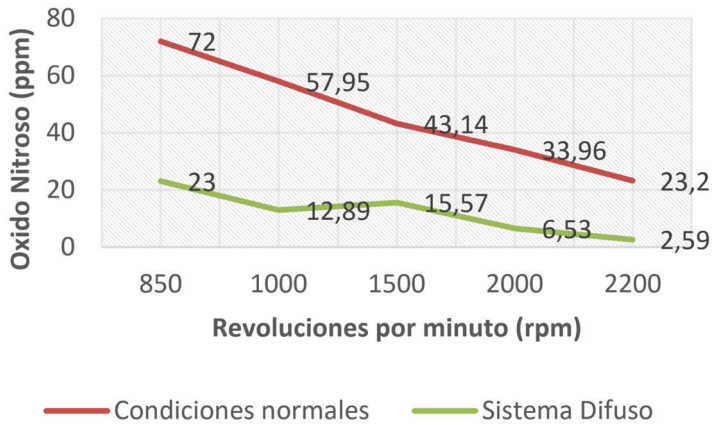
## Resultados y discusión

Obtenidos los resultados de las emisiones, llama la atención la disminución de NO<sub>x</sub>, entre el motor en condiciones normales y el mismo con un sistema de control difuso externo. Significa entonces que en los motores de combustión interna a diésel que no cuentan con un controlador difuso en su válvula EGR, la emisión de NO<sub>x</sub> será mayor que en los motores en los cuales este control se realice por la metodología planteada. Al respecto, se debe destacar que el promedio de la reducción de NO<sub>x</sub> es del 75,86%. En este valor se toma en cuenta las diferentes variaciones de revoluciones por minuto a las cuales se realiza el experimento, teniendo en cuenta que el valor de máxima reducción se encuentra con el motor girando a 2 200 rpm, en las cuales el valor de generación de NO<sub>x</sub> del motor en condiciones normales es de 23,2 ppm, mientras que el motor con un controlador difuso genera 2,59 ppm, dando un resultado del 88,83% de reducción. Por consiguiente, estos datos indican que existe un aporte a la reducción de NO<sub>x</sub> en los motores diésel al aplicar un control difuso a la válvula EGR.

En la figura 15 se visualiza la variación que existe entre tales condiciones; debido a que en los diferentes regímenes de funcionamiento del motor, la presión del cilindro y la mezcla aire-combustible varía, se obtienen diferentes niveles de emisiones de óxido nitroso para las diferentes condiciones de funcionamiento en las que se han tomado las muestras.

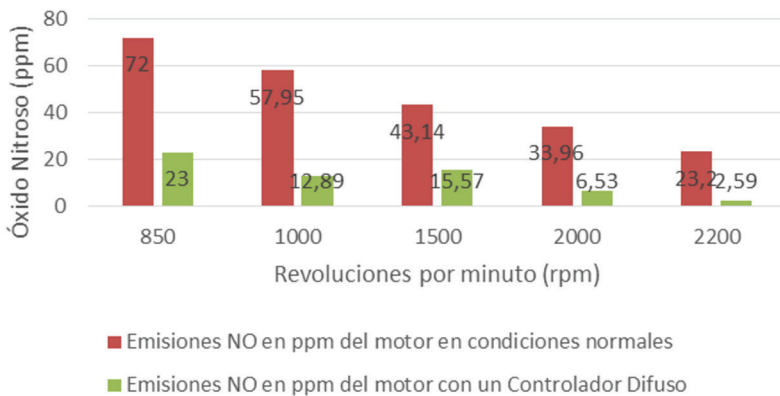
En la figura 16 se puede visualizar que en una misma condición de funcionamiento del motor existe una diferencia significativa en las emisiones de óxido nitroso entre el motor en condiciones normales de funcionamiento y el mismo con un controlador difuso aplicado a la válvula EGR.

Figura 15  
Variación de emisiones de óxido nitroso



Fuente: los autores

Figura 16  
Variación de emisiones de óxido nitroso  
en diferentes condiciones de funcionamiento del motor



Fuente: los autores

## *Análisis de varianza (ANOVA)*

Para validar las diferencias de las medias de los valores obtenidos en las diferentes muestras, se procede a realizar un análisis de varianza (ANOVA), con el uso de Minitab. Para una comparación en los diferentes análisis de muestras obtenidas, se plantean las siguientes hipótesis:

- Ho: hipótesis nula, las medias de las muestras coinciden.
- Ha: hipótesis alternativa, las medias de las muestras no son iguales.

Para el análisis y decisión de una hipótesis, el software de aplicación agrupa la información utilizando el método Tukey, con un intervalo de confianza de 95%. Se presenta en la figura 17 los resultados para las diferentes condiciones de prueba (ralentí, 1 000 rpm, 1 500 rpm, 2 000 rpm y 2 500 rpm), por lo que se establece que mediante este método las medias son significativamente diferentes.

**Figura 17**  
**Comparaciones de parejas de Tukey (Ralentí-LD)**

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%				
Factor	N	Media	Agrupación	
Ralenti	35	72,286	A	
LD	35	23,514	B	
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.				

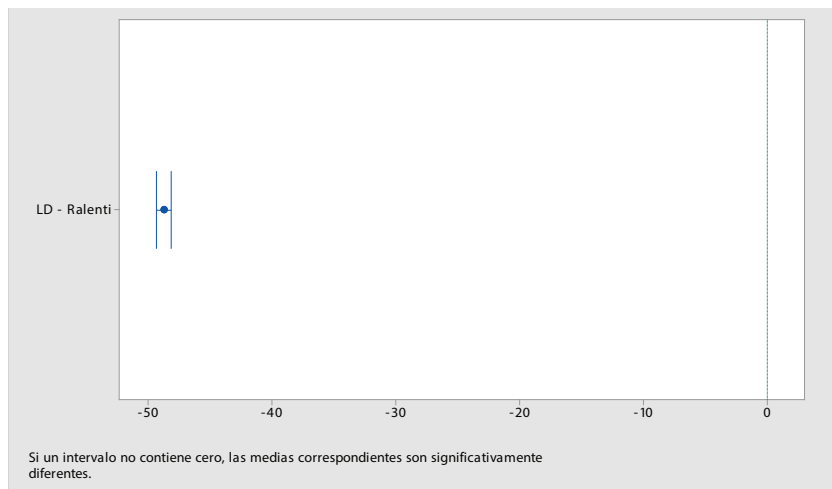
Fuente: los autores

En la figura 18 se visualiza que los intervalos de las diferencias de las medias son diferentes de cero, este resultado se tiene en todas las pruebas realizadas (ralentí, 1 000 rpm, 1 500 rpm, 2 000 rpm y 2 500 rpm), por lo que según los datos y el análisis de las figuras generadas por el software, se concluye que la hipótesis válida en esta prueba es la hipótesis alternativa (Ha), la cual nos dice que existe una variación en la emisión de óxidos nitrosos entre el motor sin un controlador externo y el mismo motor con un controlador difuso de la válvula EGR, por lo que estadísticamente se comprueba que el controlador difuso imple-



mentado en el motor incide notablemente en la reducción de las emisiones de óxido nitroso.

Figura 18  
ICs simultáneos de 95% de Tukey (ralentí)



Fuente: los autores

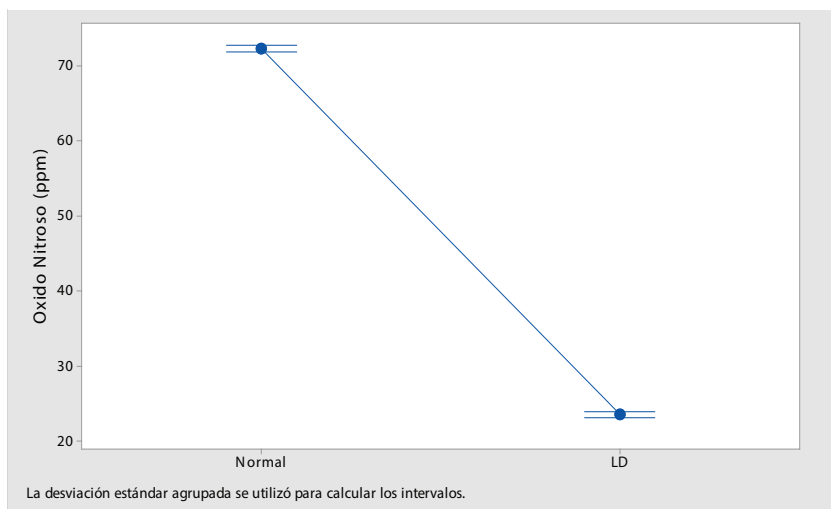
La figura 19 de intervalos indica la diferencia que existe entre los promedios de las pruebas, en las diferentes condiciones de funcionamiento del motor. Las columnas consideradas son:

- Normal: indica los valores promedio de emisiones de Óxidos Nitrosos por parte del motor en condiciones normales de funcionamiento.
- LD: indica los valores promedio de emisiones de Óxidos Nitrosos por parte del motor que cuenta con un controlador difuso de la válvula EGR.

Los resultados son los mismos para las pruebas en diferentes condiciones de funcionamiento del motor (ralentí, 1 000 rpm, 1 500 rpm, 2 000 rpm y 2 500 rpm), en ninguna de las pruebas los intervalos se interponen y sus variaciones porcentuales para cada prueba se muestran en

la tabla 1. Por lo tanto, se concluye que los resultados son significantes en la reducción de emisiones de óxido nitroso con la implementación de un controlador difuso de la válvula EGR.

Figura 19  
Gráfica de intervalos (Ralentí-LD)



Fuente: los autores

## Conclusiones

En este trabajo se establece que el control difuso de la válvula EGR es aplicable para la variación de emisiones de óxidos nitrosos en un motor Hyundai Santa Fe 2.0 CRDi Diésel, ya que con este controlador se ha disminuido un 68,05% de emisiones en ralentí y un 88,83% a 2 000 rpm.

El ambiente virtual que brinda LabView es muy favorable para el diseño de sistemas difusos, ya que minimiza la programación con la herramienta Fuzzy System Designer que ofrece el programa.

Desde el punto de vista de un sistema no lineal, el sistema de control difuso presenta una gran ventaja ya que permite implementar sistemas MISO y SISO, sin el uso de una matemática sofisticada.

Se han obtenido los valores de respuesta positivos, una vez efectuado el sistema, por lo que se concluye que el hardware y software implementados trabajan de forma correcta y deseada.

El sistema EGR trabaja generalmente con lógica clásica, debido a que se establece con dos estados: encendido o apagado; o a su vez la ECU trata de establecer valores que varíen el porcentaje de apertura de la válvula EGR, pero que no van acorde al principio de funcionamiento del sistema EGR. Con la implementación de un sistema de lógica difusa se logra cambiar los estados de funcionamiento del sistema EGR, por un rango más amplio, que se ajusta al principio de funcionamiento del sistema EGR y del funcionamiento correcto del motor en sí.

Los sistemas de lógica difusa pueden ser implementados en diferentes sistemas de control del motor, es decir, en sistemas que dependan de muchas variables de entrada y una sola variable de salida, los cuales puedan llegar a ser procesos complejos, procesos no lineales y procesos que lleguen a carecer de modelos matemáticos simples.

El presente proyecto de investigación puede ser implementado en diferentes tipos de motores, debido a que en la mayoría de vehículos que cuentan con sistemas EGR, el principio de funcionamiento es el mismo.

## Referencias bibliográficas

- Adison, W., Levin, R. y Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía*. México: Pearson.
- Cabrera, P. (2013). *Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diésel sobrealimentados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Carranco, C. y Celi, C. (2010). *Desarrollo de un sistema HMI/SCADA, diseñado con lógica difusa e implementado en un prototipo de prueba*. Quito: UPS.

- Cheng, L., Wang, W., Aitouche, A. y Peng, Z. (junio, 2015). *Robustness evaluation of real-time fuzzy logic control of the VGT and EGR on a diesel engine*. 23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), pp. 211-217.
- Deepan, G. (abril, 2013). *Experimental investigation of performance and emission characteristics in a variable compression ratio diesel engine using partly cold exhaust gas recirculation (EGR) method*. International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), pp. 727-739.
- Gonzales, C. (2011). *Técnicas de softcomputing. Lógica difusa (una introducción práctica)*. España. Recuperado de [http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf)
- Jiménez-Alonso, F., López-Martínez, J. M., Aparicio-Izquierdo, F. y Flores-Holgado, N. (2009). Comparación de tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes en autobuses urbanos. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 84(1).
- Nademi, H. y Tahami, F. (noviembre, 2015). *A predictive control of a turbocharged diesel engine for exhaust emission mitigation*. Annual Conference of the Industrial Electronics Society IECON, pp. 4890-4895.
- Nelson-Gruel, D., Chamaillard, Y., Charlet, A. y Colin, G. (octubre, 2014). *Robust control applied to minimize NO<sub>x</sub> emissions*. Conference on Control Applications (CCA), pp. 340-345.
- Passino, K. y Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Ohio: The Ohio State University-Pearson Education.
- Pla, B. (2009). *Análisis del proceso de recirculación de los gases de escape de baja presión en motores Diésel sobrealimentados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Pineda, M. y Vivas, P. (2008). *Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos*. Quito: EPN.



# Estimación de la presión de compresión de un MEC mediante el uso de RNAR y PCA

Wilmer Contreras<sup>1</sup>

Cristian Jérez<sup>2</sup>

Jean Pineda<sup>3</sup>

Cristian Garcia<sup>4</sup>

## Resumen

En la presente investigación se realiza la explicación de la metodología aplicada para determinar la presión de compresión de un motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión (MEC), el cual se basa en el estudio y caracterización de las curvas de consumo de amperaje del motor de arranque. Se aplica un protocolo de adquisición de datos y su posterior análisis estadístico basado en el análisis de componentes principales (PCA). Los valores estadísticos generan bases de datos las cuales son aplicadas para la creación y entrenamiento de una Red Neuronal Artificial Recurrente (RNAR) en la cual se obtiene un error menor al 1 %. Al emplear esta metodología, se consiguen reducir los riesgos de manipulación y errores de montaje en bujías de precalentamiento, inyectores y demás componentes del motor.

## Palabras clave

Diagnóstico, presión de compresión, RNAR, MEP, Red Elman, capa recurrente, PCA.

## Abstract

*In the present research the explanation of the methodology applied to determine the compression pressure of an alternative internal combustion engine of compression ignition (MEC), which is based on the study and characterization of the currents of amperage consumption of the starting motor. A*

- 
- 1 Máster en Sistemas Automotrices, ingeniero mecánico automotriz, docente de Motores de Combustión Interna en la UPS-Cuenca e investigador integrante del GIIT (rcontreras@ups.edu.ec).
  - 2 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la UPS-Cuenca.
  - 3 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la UPS-Cuenca.
  - 4 Máster universitario en Ingeniería del Mantenimiento por la UPV, ingeniero mecánico automotriz, docente de Mantenimiento y Termodinámica II en la UPS-Cuenca e investigador integrante del GIIT.

*data acquisition protocol and its subsequent statistical analysis based on the Principal Component Analysis (PCA) are applied. The statistical values generate databases which are applied for the creation and training of an Artificial Recurrent Neural Network (RNAR) in which an error of less than 1% is obtained. By using this methodology, you can reduce the risks of handling and assembly errors in pre-heating spark plugs, injectors and other engine components.*

**Keywords**

*Diagnosis, compression pressure, RNAR, MEP, Elman Network, layer appellant, PCA.*

## Introducción

En la actualidad la reparación y diagnóstico aplicados en el área del transporte automotriz, se basan desde esquemas artesanales hasta llegar a un alto nivel de tecnificación (Covarrubias y Covarrubias, 2013), como la utilización de inteligencia artificial con redes neuronales para estimar o predecir parámetros del motor de combustión interna. En este contexto, el estudio realizado en el año 2005 se centra en diagnosticar fallas del sensor de presión del colector de admisión en el proceso de funcionamiento del motor (Antory, 2005). En el año 2006 se realizó el estudio sobre la “Predicción y optimización de emisiones y consumo mediante redes neuronales en motores diésel”, en el cual se plantea un modelo basado en redes neuronales Feed-Forward supervisadas, para identificar y predecir el comportamiento de las emisiones volumétricas de la combustión de un motor diésel (López, 2006). Luego, para 2007, se estudió la utilización de redes neurales artificiales para estimar el par indicado de un motor diésel, lo cual puede ser útil en la implementación de estrategias de control o diagnóstico (Zweiri y Seneviratne, 2007).

Igualmente, se declara que la utilización del método estadístico Principal Component Analysis (PCA), se suma como una herramienta importante para mejorar el control de un conjunto de datos, debido a que proporciona muestras confiables para ser usadas en cualquier modelo de predicción o de estimación. En el estudio realizado en 2008 se propuso una nueva técnica, basada en la introducción del enfoque estadístico local en el marco de monitoreo convencional de Nonlinear PCA (NLPCA), que produce estadísticas que siguen una distribución normal, lo que permite una simple inferencia estadística para la detección

de fallos (Wang *et al.*, 2008). Posteriormente, se publicó en 2009 una investigación en donde se estableció un modelo de extracción de características para determinar la distribución del desgaste del revestimiento del cilindro de acuerdo con la frecuencia de onda local de la señal de vibración de la superficie (Yu, 2009).

Vale notar que existen, a nivel general, muy pocos sistemas inteligentes enfocados al diagnóstico de fallas mecánicas en las que intervenga la presión de compresión del MEC, siendo así un ejemplo los sistemas expertos como DELTA, de General Electric Company (Giarratano y Riley, 2004), utilizado para la reparación de locomotoras diésel y eléctricas. Otro ejemplo es STEAMER (Giarratano y Riley, 2004), desarrollado por Navy Research Perssoner Development Center, diseñado para enseñar el funcionamiento de una planta de propulsión a vapor como las utilizadas en los buques impulsados a vapor. Por último se puede mencionar el Proyecto Eolo CN-235, desarrollado por la empresa española Construcciones Aeronáuticas, el cual es un sistema de enseñanza interactivo para pilotos y técnicos de mantenimiento de aviones del modelo de avión CN-235.

Esta revisión bibliográfica es la que conlleva a la investigación de la generación de metodologías en las cuales se proyecta determinar la presión de compresión en la cámara de combustión en motores de encendido por compresión de una manera mínimamente intrusiva y de rápida realización.

## **Desarrollo del proyecto**

En la presente sección se desarrollan las temáticas principales que tienen que ver con la selección de parámetros menos invasivos, la instrumentación del motor, el diseño del software, la toma de datos, la validación de las muestras y la creación y entrenamiento de una RNAR.

### ***Selección de parámetros menos invasivos***

Se toma en consideración como objetivo principal evitar la manipulación y desarmado de elementos que serían necesarios para acceder a



las bujías de precalentamiento o los inyectores del sistema de alimentación diésel e instalar un probador de fugas o un compresómetro; por lo que se plantean como opciones: la medición del parámetro de medición de la corriente de consumo del motor de arranque o la medición de la caída de voltaje de la batería; estas opciones están bajo la condición de arranque del motor durante un tiempo determinado.

*Instrumentación del motor*

En el apartado anterior mencionamos los parámetros de medición para el desarrollo del experimento, de los cuales se explica que para realizar la medición de la corriente de consumo del motor de arranque se aplica una pinza amperimétrica y para la determinación de la caída de voltaje se aplica un partidor de tensión conectado directamente a los bornes de la batería, lo cual se puede observar en la tabla 1 y en la figura 1. Ahí se indica que en el motor del banco de pruebas se registra la señal del sensor CMP para identificar cada uno de los cilindros.

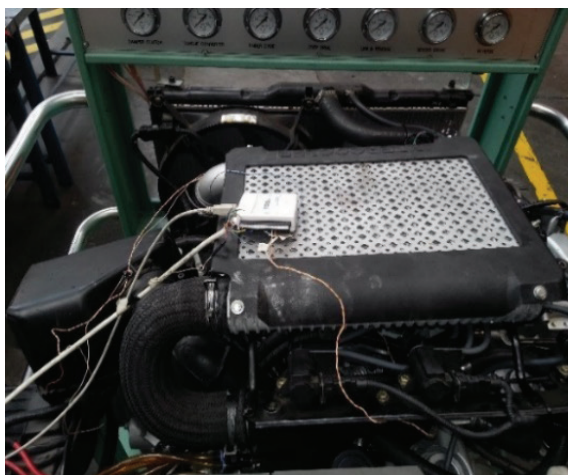
Tabla 1  
Parámetros y sensores

Parámetros	Sensores
Posición de los cilindros	CMP
Corriente	Pinza amperimétrica
Voltaje	Partidor de tensión

Fuente: los autores

La corriente de consumo del motor de arranque se registra con la instalación de una pinza amperimétrica, para lo cual no se requieren mayores exigencias; principalmente se debe identificar el cable de alimentación de energía eléctrica al motor de arranque e instalar sobre este la pinza de pruebas. La medición del voltaje se lo realiza directamente por la aplicación de pinzas en los bornes de la batería, como se indica en la figura 2, sin tener mayores complicaciones al aplicar esta opción.

Figura 1  
Instrumentación del motor



Fuente: los autores

Figura 2  
Medición de amperaje y voltaje de la batería



Fuente: los autores

Tabla 2  
Equipos

Gráfica	Características
<p>MEC</p> 	<p>Hyundai 4 Cilindros DOHC Inyección directa Riel común Turbocompresor de geometría variable Intercooler VT = 1991 cc Rc = 17.7: 1</p>
<p>Hantek CC – 650</p> 	<p>AC/DC Current Clamp Bandwidth 400 Hz 1 mV / 10 mA 650 A AC/DC frequency range: Up to 400 Hz Effective Measurement Range: 20 mA to 650 A DC</p>

Fuente: los autores

En la tabla 2 se resumen las características del motor a prueba y las características de la pinza amperimétrica aplicada.

*Diseño del software*

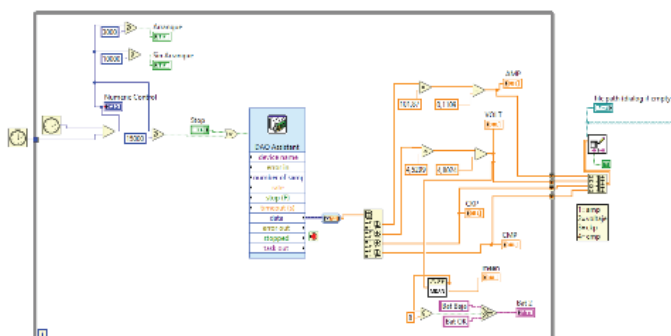
Al determinar que el consumo de amperaje es el parámetro menos invasivo junto con la medición de la caída de voltaje, se utiliza el software LabView, que es compatible con una tarjeta Ni 6009, para la adquisición de datos a una tasa de 10 kHz, lo cual cumple con el criterio de Nyquist para el análisis de la señal. También se indica que el software

realiza la extracción de parámetros característicos y de estadística descriptiva de cada prueba realizada y que, además de realizar un PCA, se genera una base de datos la cual posteriormente se aplicará en la creación y entrenamiento de una Red Neuronal Artificial Recurrente.

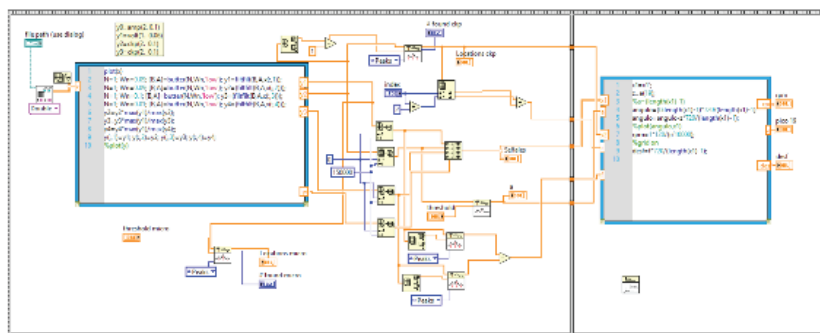
En la figura 3 (a, b y c) se presenta una secuencia que parte de la programación aplicada para la adquisición de las señales en estudio, el desarrollo del software y su entorno gráfico.

Figura 3  
Secuencia

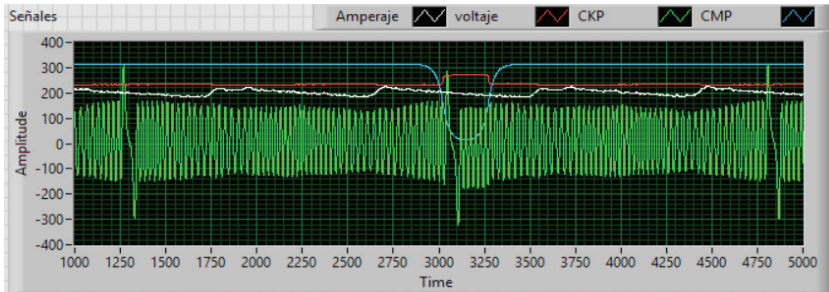
a) adquisición de las señales



b) tratamiento de las señales



## c) visualización de las señales



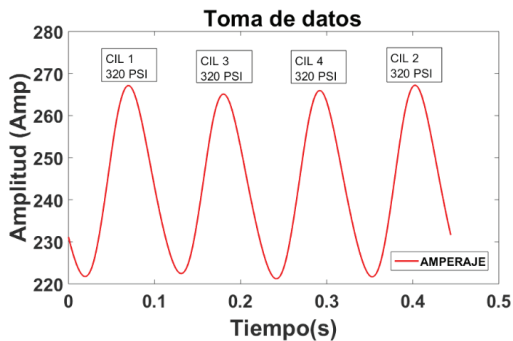
Fuente: los autores

### Toma de datos

Se presentan a continuación las gráficas del resultado de la toma de muestras del motor en estudio con diferencias en su presión de compresión, cabe agregar que el motor se encuentra en condición de arranque. En la figura 4 se grafica la curva de presión de compresión en función al oscilograma de la curva de consumo de amperaje del motor de arranque, en la cual el motor se encuentra en condiciones estándar, es decir, todos sus cilindros con una presión de compresión de 320 PSI.

Figura 4

Toma de datos del motor sin mayor variación de compresión

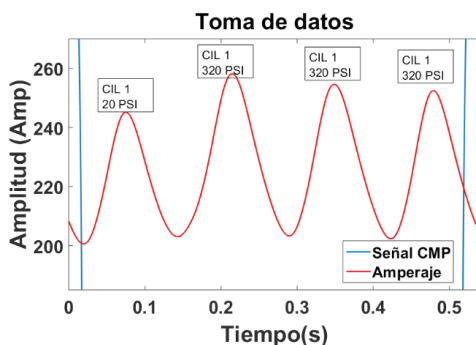


Fuente: los autores

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se grafica la curva de presión de compresión en función al oscilograma de la curva de consumo de amperaje del motor de arranque, en las cuales el motor se encuentra con variaciones de compresión en cada cilindro, es decir, el cilindro correspondiente al orden de encendido tiene una presión de compresión de 20 PSI, mientras que los otros tres cilindros restantes mantienen su presión estándar.

Figura 5

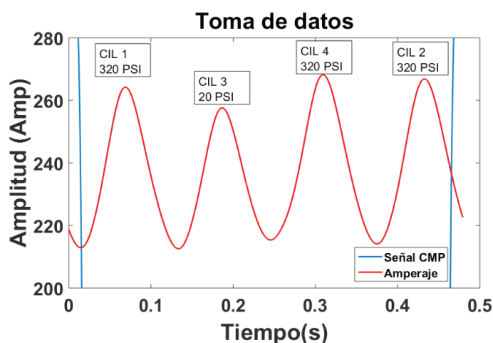
Toma de datos motor con variación de compresión en el cilindro 1



Fuente: los autores

Figura 6

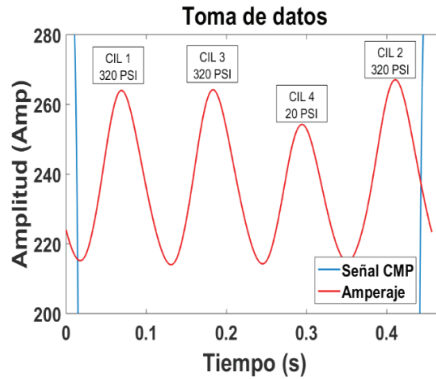
Toma de datos motor con variación de compresión en el cilindro 3



Fuente: los autores

Figura 7

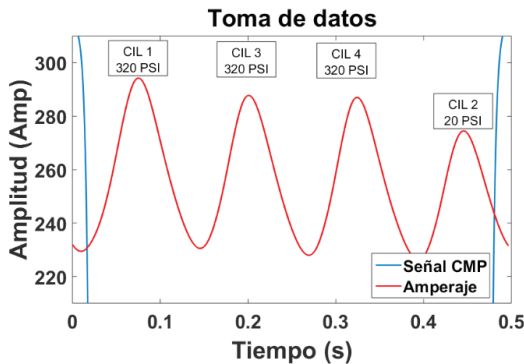
Toma de datos motor con variación de compresión en el cilindro 4



Fuente: los autores

Figura 8

Toma de datos motor con variación de compresión en el cilindro 2



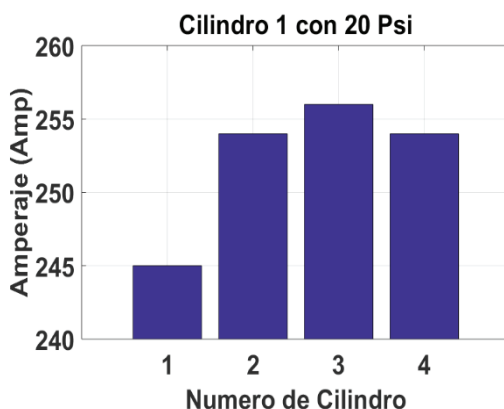
Fuente: los autores

A continuación, en las figuras 9, 10, 11 y 12, se aplica un diagrama de barras, en el cual cada barra representa el valor de la presión de compresión en función al consumo de amperaje del motor de arranque cuando el motor se encuentra con variaciones de la presión de compresión.

sión en cada cilindro, es decir, el cilindro correspondiente al orden: 1-2-3-4, tiene una presión de compresión de 20 PSI, mientras que los otros tres cilindros restantes mantienen su presión estándar.

Figura 9

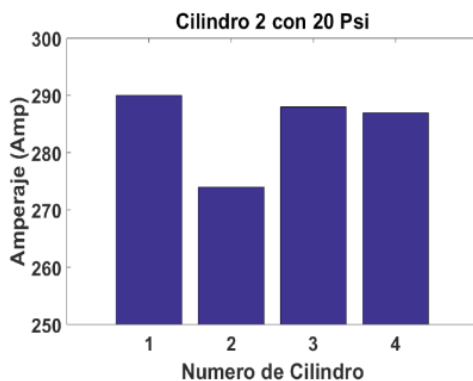
Motor con variación de compresión en el cilindro 1



Fuente: los autores

Figura 10

Motor con variación de compresión en el cilindro 2



Fuente: los autores

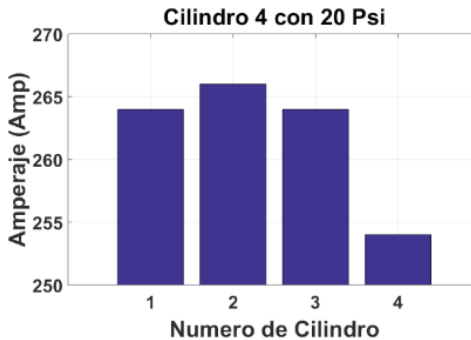


Figura 11  
Motor con variación de compresión en el cilindro 3



Fuente: los autores

Figura 12  
Motor con variación de compresión en el cilindro 4

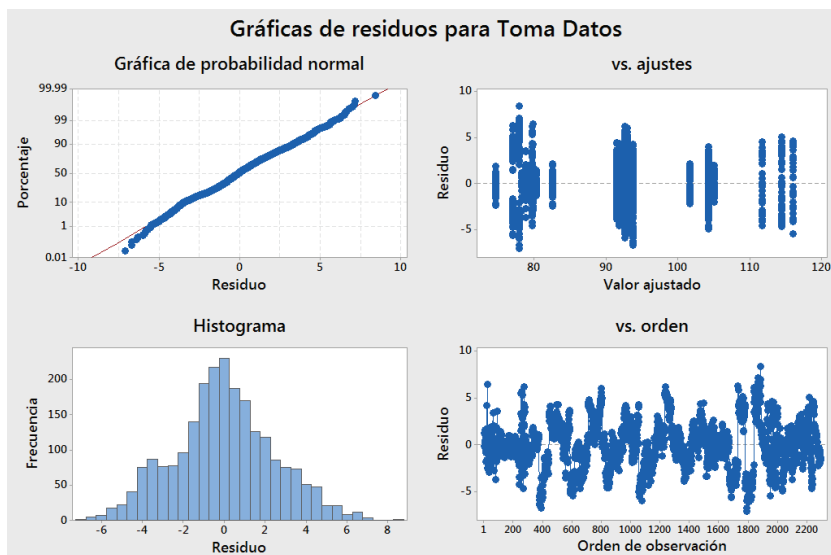


Fuente: los autores

### *Validación de toma de muestras*

Las muestras tomadas por el software diseñado en la plataforma virtual de Labview son analizadas estadísticamente mediante un ANOVA, ejecutado en el software estadístico Minitab, del cual tenemos los siguientes resultados:

Figura 13  
ANOVA de muestras



Fuente: los autores

La dispersión de puntos en el gráfico de Residuos vs. Porcentaje, mostrado en la figura 13, tiende a ser una línea recta, lo que afirma la normalidad de los datos y que además está confirmada por la distribución de valores en forma de la Campana de Gauss en el histograma. Se valida el supuesto de varianza constante debido a que en la gráfica del Valor Ajustado vs. Residuo no se observa ningún patrón de acumulación de puntos. Además, se valida que las tomas fueron de manera aleatoria, ya que se observa que los valores en la gráfica de Orden de Observación vs. Residuo los puntos no muestran regiones de acumulación en la parte superior o inferior del cero, sino más bien estos fluctúan en un patrón aleatorio alrededor de la línea del cero. En síntesis, la toma de datos es correcta y lo demuestra el resultado del ANOVA.

## *Análisis de componentes principales*

Esta metodología es utilizada para reducir el número de columnas de análisis de los datos de entrada que serán aplicados a la red neuronal, ya que ser una técnica multivariante permite el tratamiento de las variables obtenidas en el análisis estadístico descriptivo de la señal de corriente de consumo del motor de arranque y de la caída de tensión que esta genera.

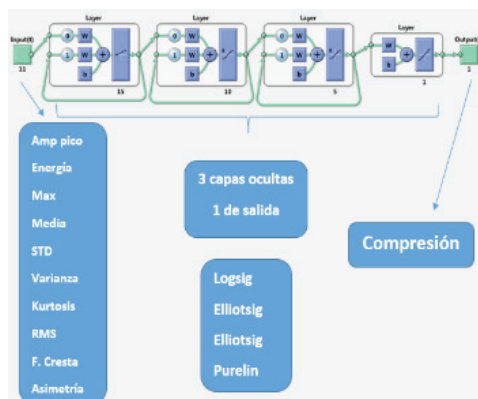
Este análisis aporta directamente a la identificación de variables ficticias formadas a partir de la combinación de los fenómenos observados. Además, se consigue sintetizar los datos relacionándolos entre sí a través de un proceso de cálculo de raíces y vectores característicos de una matriz simétrica. Para que esto se verifique las variables deben cumplir una correlación entre sí, de manera que se expresen como combinación lineal de las variables que realmente han sido observadas, en resumen, se determina que la mayor influencia de datos se encuentra sobre los tres primeros componentes.

## *Red neuronal tipo Elman*

Se aplica una red neuronal tipo Elman, esto basado en una corrida pre-experimental en donde se realizaron entrenamientos con diferentes tipos de redes como: Feed-Forward, Cascade-Forward, Elman-Fordward, de las cuales se escoge la que menor error obtiene. Hecha la observación anterior, se indica que los parámetros de entrada son los valores característicos que resultan del análisis de la curva de consumo de amperaje del motor de arranque, los cuales se presentan en la figura 14:

Se aplican tres capas, ocultas cada una con 15, 10 y 5 neuronas por cada capa, esto debido al menor gasto computacional, ya que al aumentar capas y neuronas no disminuye el error y el tiempo de ejecución aumenta. Para continuar, se indica que las funciones de activación entre la neurona de entrada y la primera es de tipo Logsig, seguida en las dos capas de una función Elliotsig y por último entre la capa de salida y la neurona de salida una función de tipo Purelin.

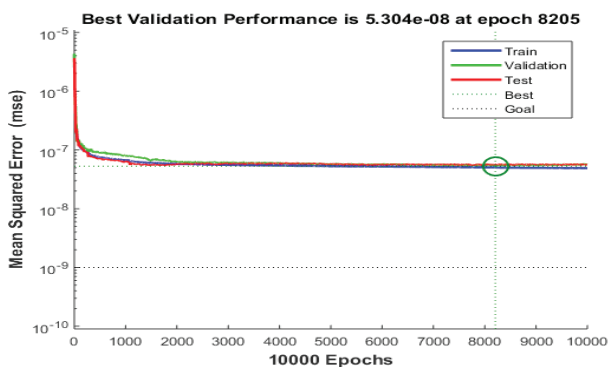
Figura 14  
Red tipo Elman



Fuente: los autores

La neurona de salida indica el valor del resultado de la compresión, esto en función al análisis computacional que genera la RNAR tipo Elman. El entrenamiento de la red se realiza con la función Levenberg-Marquardt (*trainlm*), la que se muestra en la siguiente figura:

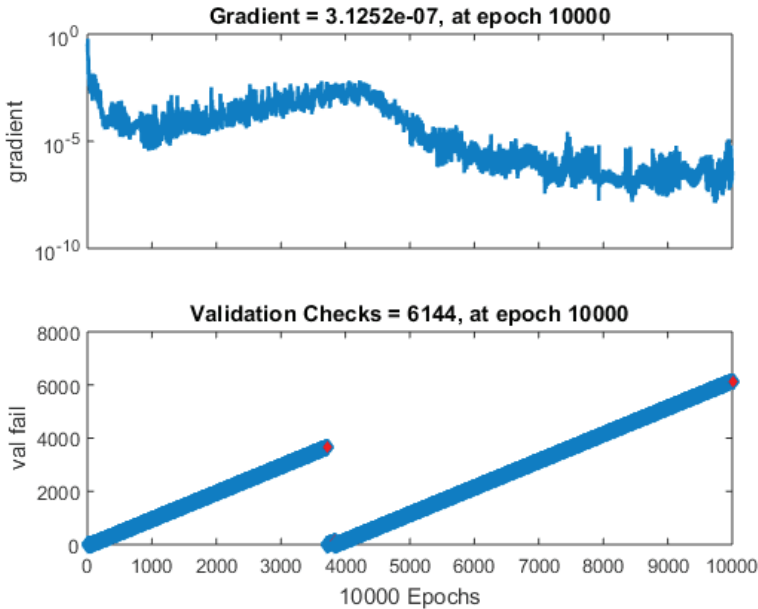
Figura 15  
Entrenamiento de red tipo Elman



Fuente: los autores

La figura 16 indica el gradiente en la reducción del error y el número de épocas que se realizan para el entrenamiento de la RNAR.

Figura 16  
Evolución de entrenamiento de red tipo Elman



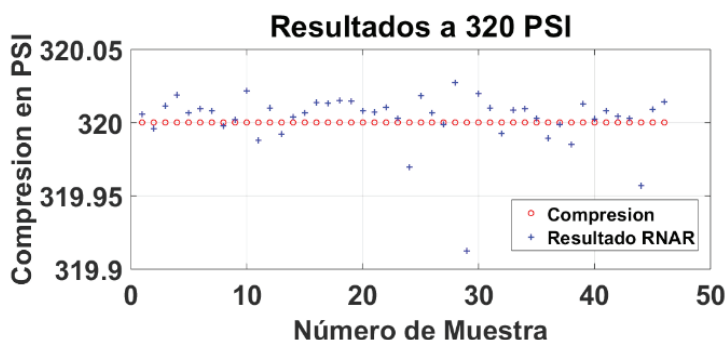
Fuente: los autores

## Resultados y discusión

A fin de comparar el correcto funcionamiento de la RNAR creada y entrenada del proceso propuesto, se procede a realizar varias pruebas de diversos valores de compresión. En este apartado se presentan dos compresiones en concreto, que son valores que están alrededor de 320 PSI, en caso de motores con un funcionamiento correcto, y otro caso en el que los valores se encuentran alrededor de 20 PSI, lo que indica un fallo de desbalanceo en la combustión generalizada del motor.

En la figura 17 se muestra el resultado de los valores obtenidos por la RNAR para tomas de compresión de 320 PSI, donde el valor del promedio del error del resultado y el valor real es de 0,0027.

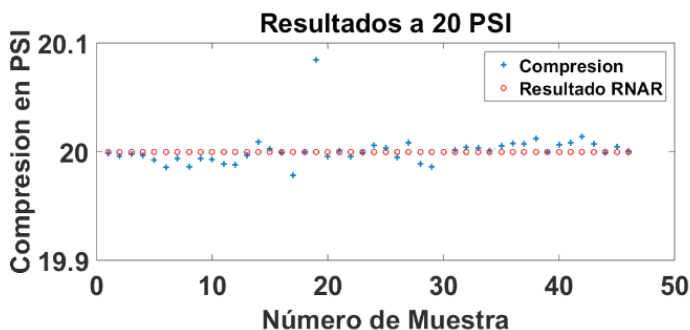
Figura 17  
Resultados de compresión a 320 PSI



Fuente: los autores

En la figura 18 se muestra el resultado de los valores obtenidos por la RNAR para tomas de compresión de 20 PSI, donde el valor del promedio del error del resultado y el valor real son de 0,0033.

Figura 18  
Resultados de compresión a 20 PSI



Fuente: los autores

Obtenidos los resultados de la presión de compresión, llama la atención la diferencia marcada entre el motor en condiciones normales y el mismo con una falla en la presión de compresión por cilindro. Significa, entonces, que el resultado de la aplicación del algoritmo de la RNAR es capaz de calcular un valor muy próximo al verdadero, tanto en condiciones normales como en condición de fallo del motor por falta de compresión en uno de sus cilindros.

Al respecto, se debe destacar que el rango del valor de presión de compresión obtenida en condiciones estándar está entre 319,92 y 320,048 PSI. En lo que respecta al motor con falla en la presión de compresión, el rango del valor esta entre 19,98 y 20,019 PSI. Dando como resultado en los dos casos un promedio de error del 0,3%, siendo este valor muy aceptable para temas de diagnóstico y determinación de fallos del motor.

## Conclusiones

En este trabajo se muestra que la aplicación de redes neuronales artificiales recurrentes (RNAR) en la determinación de la compresión de un MEC constituye una alternativa claramente viable, además, presenta la ventaja de ser mínimamente invasiva con rangos de error menores al 1%, pudiendo determinar con un alto grado de probabilidad el valor de la compresión.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es que el proceso de medición de compresión se aplica con mucha frecuencia en la evaluación de compra-venta de vehículos, por lo tanto, esta metodología se presenta como una técnica altamente apropiada para ser integrada en un sistema de diagnóstico con la rapidez computacional que ofrecen las redes neuronales.

Tras la elaboración de este estudio, en el cual se aplica una estructura de red neuronal tipo Elman, se ha observado que esta última es la

más apropiada dada la naturaleza dinámica de los patrones obtenidos por el análisis del consumo de corriente del motor de arranque.

## Referencias bibliográficas

- Antory, D. (noviembre, 2005). Fault diagnosis application in an automotive diesel engine using auto-associative neural networks. *Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*. International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, 2, 109-116.
- Covarrubias, R. F. y Covarrubias, A. G. F. (2013). *Desarrollo de un sistema experto para el diagnóstico de fallas automotrices*. La Plata-Argentina. Repositorio online SEDICI.
- Giarratano, J. y Riley, G. (2004). *Sistemas expertos, principios y programación*. México: s.e.
- Khajavi, M. N., Nasiri, S. y Eslami, A. (2014). Combined fault detection and classification of internal combustion engine using neural network. *Journal of Vibroengineering*, 16(8).
- López, L. H. (2006). *Predicción y optimización de emisores y consumo mediante redes neuronales en motores diésel*. Valencia. Reverté.
- Samadani, E., Shamekhi, A. H., Behroozi, M. H. y Chini, R. (2009). A method for pre-calibration of DI diesel engine emissions and performance using neural network and multi-objective genetic algorithm. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 28(4), 61-70.
- Wang, X., Kruger, U., Irwin, G. W., McCullough, G. y McDowell, N. (2008). Nonlinear PCA with the local approach for diesel engine fault detection and diagnosis. *Transactions on Control Systems Technology*, 16(1), 122-129.
- Yap, W. K. y Karri, V. (2012). Emissions predictive modelling by investigating various neural network models. *Expert Systems with Applications*, 39, 2421-2426.
- Yu, Y., Baoliang, L. y Jingshan, S. (julio, 2009). *PCA and Local-wave method Analysis on Fault Diagnosis of Diesel*. International Conference on Information Technology and Computer Science ITCs, 2, 317-321.
- Zweiri, Y. H. y Seneviratne, D. (mayo, 2007). *Diesel engine indicated torque estimation based on artificial neural networks*. International Conference on Computer Systems and Applications, pp. 791-798.





# Implementación académica de un DAQ para disminución de desbalance en equipos rotativos

---

Jhon Edward Lizarazo<sup>1</sup>

José Miguel Segnini<sup>2</sup>

Mary Josefina Vergara<sup>3</sup>

## Resumen

Los equipos rotativos juegan un papel preponderante en la producción industrial. Por su propio diseño el desbalance forma parte de su funcionamiento, ya que masas excéntricas son comunes en su estructura. Sin embargo, las amplitudes de vibraciones producidas por tales masas excéntricas están limitadas y por lo tanto se deben aplicar procedimientos automatizados capaces de asegurar que ellas no sobrepasen un valor permisible. En el presente capítulo se desarrolla un sistema automatizado que utiliza un instrumento virtual para apoyar la detección y diagnóstico del desbalance en un sistema rotor-dinámico. En este, se realiza un análisis de fase y de severidad de vibración basado en norma ISO 10816, necesaria para apoyar el análisis de desbalance. El procedimiento empleado, sirve de base para determinar la cantidad de masa y el lugar donde debe colocarse para disminuir la vibración causada por dicho desbalance cuando se implementa el balanceo en uno o dos planos. El sistema desarrollado para detección, diagnóstico y corrección de desbalance se utiliza para promover y reforzar la habilidad de los estudiantes en la solución de problemas asociados al mantenimiento de equipos rotativos a través de actividades experimentales y capacitación industrial.

## Palabras clave

Rotor, desbalance, severidad y vibración.

- 1 Miembro del Grupo de Investigación GINDET, línea de Electrónica y Telecomunicaciones. Forma parte del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA-Tecnoparque, nodo Ocaña, Colombia (jlizarazop@sena.edu.co).
- 2 Miembro del Grupo de Diseño y Modelado de Máquinas DIMMA. Forma parte de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela (vmmary@ula.ve).
- 3 Miembro del Grupo de Investigación en Diseño Sustentable GIDISUS. Forma parte de la Escuela de Diseño de Productos y Control de Procesos de la Pontificia Universidad Católica, Ibarra, Ecuador (jmsegnini@pucesi.edu.ec).

**Abstract**

*Rotating equipment plays a preponderant role in industrial production. By its own design the imbalance is part of its operation, since eccentric masses are common in its structure. However, the amplitudes of vibrations produced by such eccentric masses are limited and therefore automated procedures capable of ensuring that they do not exceed a permissible value must be applied. In this chapter an automated system is developed that uses a virtual instrument to support the detection and diagnosis of imbalance in a rotor-dynamic system. In this, a phase and vibration severity analysis is performed based on ISO 10816, necessary to support the imbalance analysis. The procedure used is the basis for determining the amount of mass and the place where it should be placed to reduce the vibration caused by the imbalance when balancing is implemented in one or two planes. The system developed for detection, diagnosis and correction of unbalance is used to promote and reinforce the student's ability in the solution of problems associated with the maintenance of rotating equipment through experimental activities and industrial training.*

**Keywords**

*Rotor, unbalanced, vibration severity.*

**Introducción**

Cuando los equipos fallan mientras se encuentran en operación, reducen considerablemente la vida útil de otros componentes del sistema, en algunos casos, se producen daños severos que ocasionan el reemplazo de componentes, lo que implica un incremento del mantenimiento y su inversión.

Para poder prevenir estos eventos, las empresas realizan labores de mantenimiento preventivo que ayudan a disminuir los paros forzados de planta. El mantenimiento preventivo puede ser programado o predictivo. En el primero, las revisiones se realizan por periodos establecidos previamente. Dicho periodo puede establecerse por recomendaciones del fabricante (cada cierta cantidad de horas de funcionamiento) o basado en datos estadísticos históricos (usando el tiempo promedio entre fallos), entre otras (Ocampo, 2013). En el caso del mantenimiento preventivo basado en predicción, el propósito es monitorear las condiciones en las que se encuentra un equipo para predecir cuándo parar para realizar reparaciones y ajustes. Este tipo de actividades se conoce como mantenimiento basado en condición (CBM, por sus siglas en inglés) y tiene como filosofía que el cambio en la condición y/o desempeño del equipo es el factor preponderante para la toma de decisión sobre

la reparación o el remplazo del equipo (Raheja *et al.*, 2006). En otras palabras, el CBM busca maximizar los resultados de la inversión en mantenimiento por medio de la recolocación e interpretación en vivo o cada cierto tiempo de datos relacionados a la condición de operación de componentes críticos de un equipo.

Una de las variables más utilizadas para monitorear la condición de los elementos de un equipo es su nivel de vibración. Se conoce que los equipos emiten vibraciones cuando se encuentran en operación, pero cuando estas vibraciones son excesivas y sobrepasan ciertos límites preestablecidos, generalmente se debe a problemas mecánicos o eléctricos. En consecuencia, monitorear las vibraciones de un equipo ayuda a resguardar la condición del equipo, así como a conocer de antemano el tiempo para aplicar mantenimiento.

En equipos rotativos, estas vibraciones pueden ser ocasionadas por desbalance, que puede producir a su vez el deterioro progresivo y fallas prematuras de los cojinetes anti-fricción que soportan el rotor. Esto se corrige mediante un análisis de vibraciones y un balanceo dinámico del equipo afectado. Así, el análisis de vibraciones en equipos rotativos permite interpretar sus lecturas y eventualmente diagnosticar con precisión el tipo de falla (Olarde *et al.*, 2010).

Comercialmente se encuentran dispositivos analizadores de vibración y paquetes computacionales que entregan al usuario las gráficas de las señales de las vibraciones para que se pueda realizar su interpretación y emitir un diagnóstico acertado. La casa fabricante SpectraQuest (SpectraQuest, 2017), la consultora V-TEK Associates (V-TEK, 2013) y la empresa Hofmann Mess und Auswuchttechnik GmbH & Co. (Hofmann, 2007) ofertan productos capaces de realizar pruebas de desalineación, desbalance, velocidad crítica y simulación de fallas en rodamientos. El valor comercial de estos bancos va desde los tres millones hasta los sesenta millones de dólares, lo que implica una inversión con-

siderable para un banco de prueba con fines académicos, que además puede ser utilizado para capacitación industrial.

Adicionalmente, se han realizados proyectos académicos direccionados al diseño y/o construcción de bancos de prueba para la disminución de desbalance en equipos rotativos, como se puede ver, cronológicamente, en Sánchez y Pintor (2004), González (*et al.*, 2005), Blanco (*et al.*, 2010), Krak (*et al.*, 2011), Silva (*et al.*, 2013), Torres y Quezada (2016), y Espino (*et al.*, 2017). En esta misma dirección, otros proyectos solo desarrollan el instrumento virtual de análisis de vibración por desbalance, por ejemplo: Estupiñán (*et al.*, 2006), Ocampo (2013), Sampayo (*et al.*, 2014) y Silva-Juárez (*et al.*, 2016). Todos estos proyectos buscan interpretar las vibraciones por desbalance en equipos rotativos y así, proponer dispositivos físicos y/o virtuales que dinámicamente disminuyan estos desbalances y por consecuencia la amplitud de vibración que éstos ocasionan.

El objetivo de esta investigación es desarrollar una propuesta didáctica para promover y reforzar la habilidad de los estudiantes en la solución de problemas asociados al mantenimiento de equipos rotativos a través de actividades experimentales, que pueden ser incluidas en capacitaciones a nivel industrial. En base a lo anterior, en el presente trabajo se automatiza un sistema rotor-dinámico para realizar un análisis de vibración por desbalance, que permita disminuir la amplitud de vibraciones causadas por el mismo y que sirve como base para crear prácticas que introduzcan al estudiante al ambiente industrial. El estudio toma en cuenta las variables de diseño y el montaje del banco de pruebas (Rotor 5000) del Laboratorio de Mecánica de Materiales (LABMM) de la Universidad de Los Andes (ULA, Venezuela). Para ello, se ensambló el banco de pruebas Rotor 5000 con todos los dispositivos y/o sensores comerciales existentes en el laboratorio: dos acelerómetros 736T, un velocímetro 793V y la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E; adicionalmente, se diseñó un tacómetro utilizando un emisor y receptor infrarrojo, el cual mide la frecuencia de paso de la señal en pulso por

vuelta del rotor y un instrumento virtual para medición de vibraciones y balanceo del rotor mediante programación gráfica en LabView.

Se implementaron tres instrumentos virtuales para la medición de vibraciones aplicando métodos de balanceo industriales como: balanceo en un plano, balanceo en dos planos y evaluación de severidad vibratoria. Estos instrumentos virtuales demostraron que son funcionales para el Rotor 5000, reduciendo en uno de los casos hasta un 70% la vibración presentada por desbalanceo por masa excéntrica.

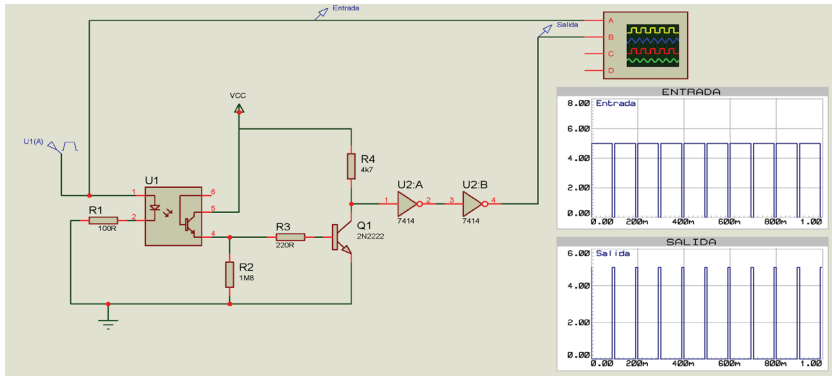
## **Materiales y métodos**

### *Diseño de tacómetro*

La medición de velocidad en la industria se efectúa de dos formas: con tacómetros mecánicos y tacómetros eléctricos. Los primeros detectan el número de vueltas del eje de la máquina por medios exclusivamente mecánicos pudiendo incorporar o no la medición conjunta del tiempo para determinar el número de revoluciones por minuto (rpm); mientras que los segundos captan la velocidad por sistemas eléctricos. Para usos industriales se suelen utilizar tacómetros eléctricos porque permiten la transformación directa de la señal para alimentar los instrumentos registradores o controladores de panel. Un caso de aplicación típica lo constituye la medición de la velocidad de giro del eje de una turbina en una central de energía.

Para desarrollar el tacómetro se seleccionó un emisor de luz infrarroja y un fototransistor como receptor del haz luminoso que conmute cada vez que detecte un objeto obstaculizando el mismo. Para diseñar y simular el circuito se utilizó el programa ISIS de Proteus. En la figura 1 se muestran los dispositivos electrónicos necesarios para obtener el circuito interruptor del haz luminoso.

Figura 1  
Diagrama de circuito para tacómetro infrarrojo



Fuente: los autores

En la figura 2 se muestra la manera de montar el tacómetro utilizado para la tarea de medir la velocidad de giro del Rotor 5000 (máquina utilizada como base para el banco de pruebas).

Figura 2  
Montaje de emisor y receptor infrarrojo



Fuente: los autores

La señal del tacómetro se envía a la tarjeta de adquisición de datos DaqPAD-6020E para calcular la velocidad de giro midiendo la frecuencia de paso de la señal, teniendo un pulso por vuelta del rotor.

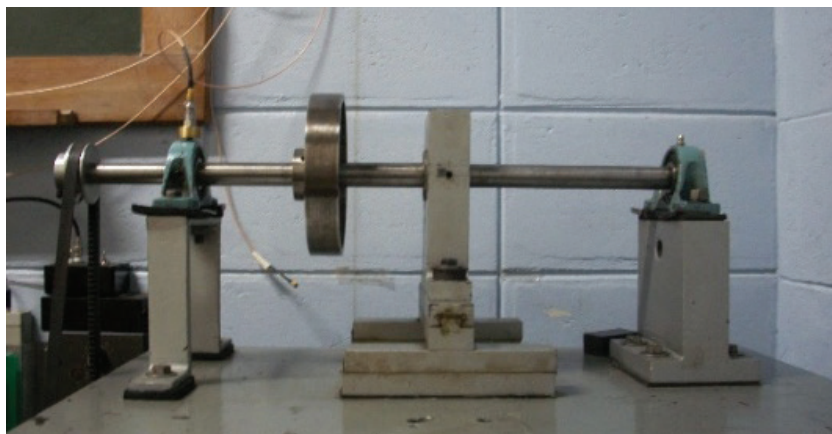
### *Montaje e instalación de equipos en el laboratorio*

Uno de los factores importantes a la hora de implementar el instrumento virtual es la correspondiente instalación y puesta a punto de los dispositivos de medición y estructura física del banco de pruebas. Para ello, luego de diseñar el tacómetro, se agrupa el mismo en el conjunto de instrumentos: tarjeta de adquisición de datos, transductores, fuentes, motor, ajuste de la estructura física y demás elementos de conexión eléctrica.

En la figura 3a se observa el banco de pruebas utilizado para la tarea de medición de vibraciones en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de los Andes. La tarjeta de adquisición de datos y el control de velocidad del motor que acciona el rotor se muestra en la figura 3b.

Figura 3  
Banco y tarjeta

a) banco de pruebas Rotor 5000





b) tarjeta de adquisición de datos DaqPAD-6020E, motor, controlador de velocidad de motor y fuentes de los transductores de aceleración y velocidad



Fuente: los autores

### *Programación del instrumento virtual para medición de vibraciones y balanceo*

El software diseñado para la tarea de balancear el rotor está compuesto de dos subinstrumentos llamados INVIBA (Instrumento Virtual para Balancear Rotor-5000) e INVIBRA (Instrumento Virtual para la Medición de Vibraciones). Esta distinción se realiza ya que son dos módulos independientes, pero trabajan en conjunto para realizar la tarea final, que es balancear la máquina Rotor 5000. El módulo INVIBA se ejecuta en el instante que se inicia el programa de balanceo como se muestra en la figura 4a. Esta ventana indica al usuario qué tarea desea

realizar mostrando tres opciones principales que son: balancear en un plano, balancear en dos planos y evaluar severidad vibratoria.

En la figura 4b se muestra la interfaz principal del programa es INVIBRA, ya que en esta ventana se mide y se realiza todo el cálculo según el método seleccionado en la ventana INVIBA, sea balanceo en un plano, balanceo en dos o evaluar la severidad de la vibración.

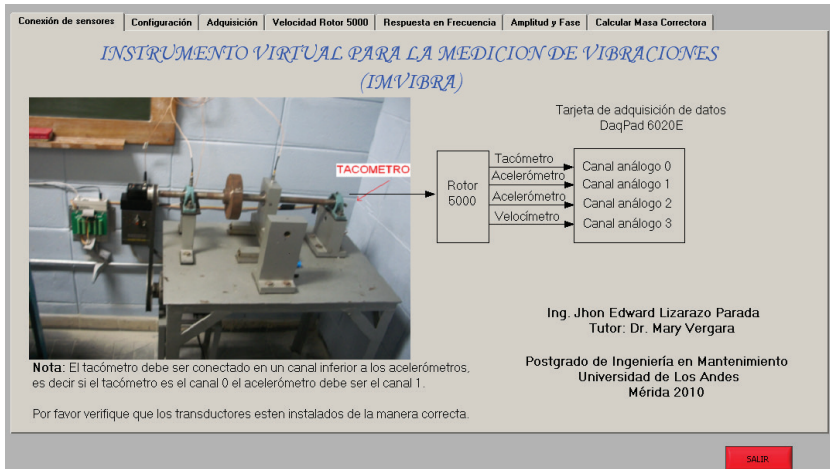
Una vez que se detecta el desbalance, el programa diseñado estima las masas de corrección para el balanceo en dos planos por el método de coeficientes de influencia y muestra al usuario, de forma gráfica, el lugar y los gramos de masa que debe colocar en el disco del rotor a fin de balancear el sistema (figura 5), lo que conduce a la disminución de la vibración producida por el desbalanceo.

Figura 4  
INVIBA e INVIBRA

a) interfaz inicial del programa INVIBA para balancear el Rotor 5000

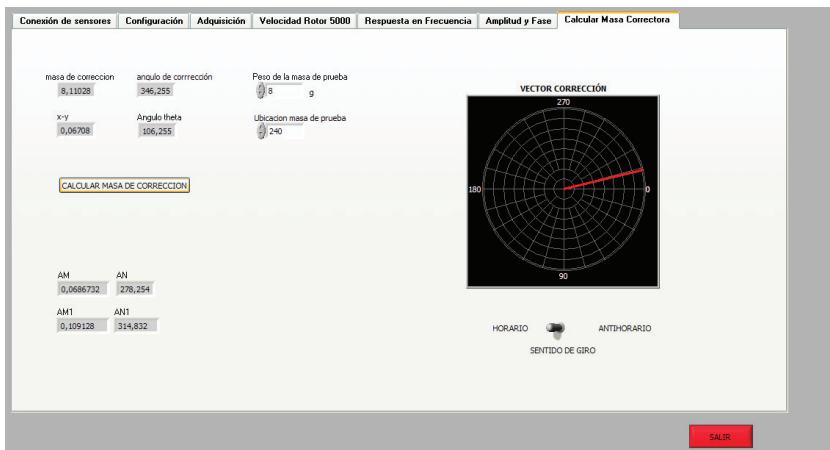


## b) interfaz de INVIBRA para medición de vibraciones



Fuente: los autores

Figura 5  
Interfaz de cálculo de masas de corrección para el balanceo  
en dos planos por el método de coeficientes de influencia



Fuente: los autores

## Resultados y discusión

El rango de medición es de  $-10\text{ V}$  a  $10\text{ V}$ , por lo tanto, se pueden adquirir datos con valor límite de 100 gravedades y el rango límite de sensor son 500 g; de la misma manera se tiene una resolución de 0,488 mV como mínima unidad de medida. En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los métodos de balanceo aplicados y para la evaluación de la severidad de la vibración.

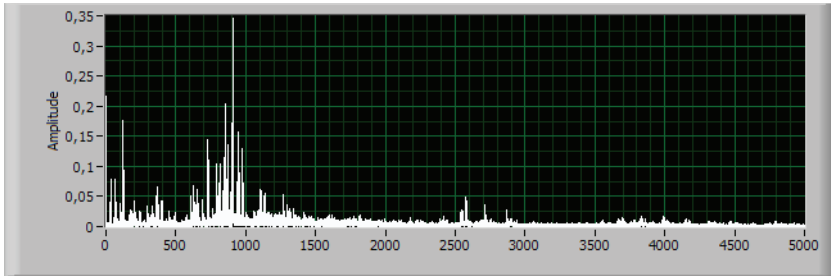
### *Balanceo en un plano*

Para el balanceo en un plano se necesitan dos muestras, una sin ningún tipo de masa de prueba y otra con una masa de prueba que permita perturbar el sistema obteniendo las mediciones de amplitud y fase en cada una de las muestras. En esta prueba se trabaja con el transductor de velocidad, ya que presenta una respuesta más adecuada en la velocidad para frecuencias bajas. En la figura 6 se muestra el contenido espectral para la señal tomada por el acelerómetro a una velocidad de 1 960 rpm y la figura 7 muestra la señal obtenida por el velocímetro a la misma velocidad de operación, donde se muestra que el velocímetro tiene un mejor comportamiento en las frecuencias bajas ya que las componentes de alta frecuencia se suprimen o integran por la señal de velocidad. Por ello, el rango de trabajo para el velocímetro es de 1 000 a 1 2000 rpm donde se tiene una respuesta lineal. De lo anterior, se desprende que el velocímetro en el caso planteado, debe ser utilizado para el balanceo en un plano, como se describe a continuación.

En la práctica, se toma una muestra a una velocidad de operación de 1 937 rpm sin ninguna masa de balanceo como vibración inicial en el plano medido. En la figura 7 se muestra el espectro de vibración de la señal del velocímetro y la señal en el tiempo del tacómetro como de la velocidad de vibración. La amplitud de vibración observada contiene una frecuencia fundamental en 32,5 Hz, correspondiente a la frecuencia de orden 1 con una amplitud de 0,09 in/s y una fase de  $282^\circ$ . Luego se agrega un peso de prueba de 8 gr ubicado a  $60^\circ$  de la marca de referen-

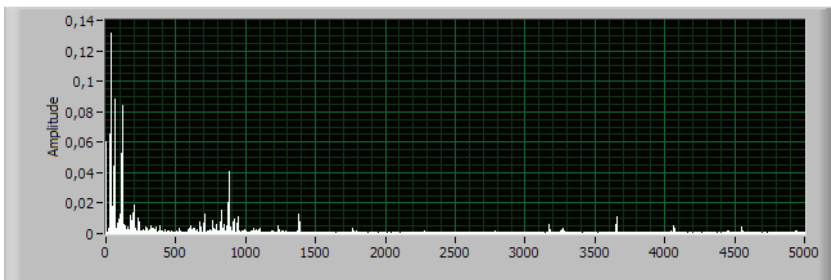
cia del tacómetro, obteniendo un valor de amplitud de 0,078 in/s y un corrimiento de fase de 233°.

Figura 6  
Respuesta en frecuencia para acelerómetro



Fuente: los autores

Figura 7  
Respuesta en frecuencia para velocímetro

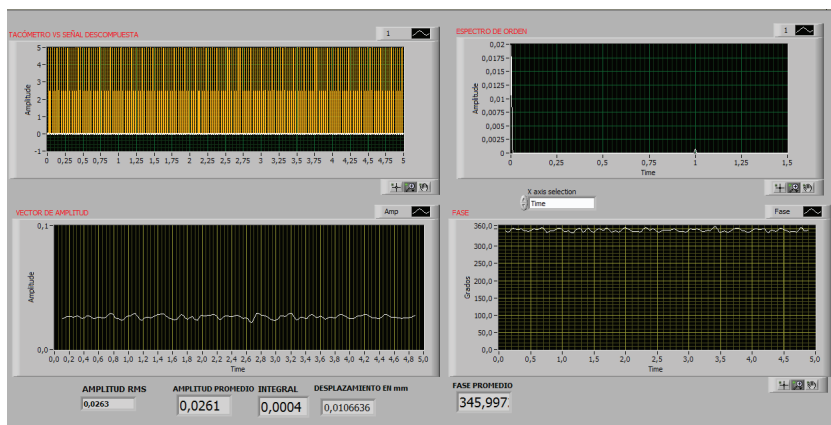


Fuente: los autores

Luego de tener capturados los datos de velocidad de vibración en los dos casos, se procede a ejecutar el programa de balanceo en un plano, obteniendo el siguiente resultado: un peso de corrección 9,2 gr ubicado en el ángulo -12,20. Debido a que el Rotor 5000 tiene cuatro agujeros igualmente espaciados con ángulos de 90°, uno de ellos queda en la posición -30° de la posición de referencia del tacómetro (ángulo de fase se mide inverso al sentido de rotación del eje principal).

En el siguiente paso se ingresa una pesa de corrección aproximada de 8 gr en la posición  $-30^\circ$ , obteniendo el resultado mostrado en la figura 8, donde se observa una amplitud de vibración de 0,0261 in/s y una fase estable de  $345^\circ$ , logrando un balanceo óptimo, ya que se redujo la amplitud en un 70% del valor inicial, comprobando así que el programa funciona de la manera correcta para esta prueba. Si se pudiese colocar la masa correctora en el ángulo correcto de  $9^\circ$ , la reducción en la amplitud sería mucho mayor que la tomada como óptima.

Figura 8  
Resultado de vibración con masa correctora instalada



Fuente: los autores

## Balanceo en dos planos

Para efectuar el balanceo en dos planos es necesario aclarar los dos planos de perturbación donde se ingresarán las masas de prueba. Por lo general, para este tipo de banco se utilizan dos discos separados a una distancia  $L$  para así poder establecer un rango de perturbación entre un plano cercano al punto de medida y un plano lejano comúnmente llamado (Near y Far). Para demostrar que el programa está funcionando de la manera correcta se compara con datos obtenidos de Méndez-Adriani (2000), para

balanceo en dos planos, obteniendo los mismos resultados referentes (figura 9). Para ello se utilizó la primera versión del programa de balanceo en dos planos realizado en LabView con la opción de simulación de entrada de datos, con datos constantes de entrada para ángulos de fase y amplitudes en cada una de las pruebas descritas por el método de balanceo por coeficientes de influencia, como se muestran en la tabla 1.

Figura 9  
Resultado balanceo en dos planos con datos constantes  
tomados de Méndez-Adriani



Fuente: los autores

Tabla 1  
Datos de entrada al programa de balanceo

Near	Ángulo Near	Far	Ángulo Far	Peso prueba	Ángulo peso
38	256	19	36	Sin masa	Sin masa
31	300	37	75	7,95	90
17	264	31	21	7,95	90

Fuente: los autores

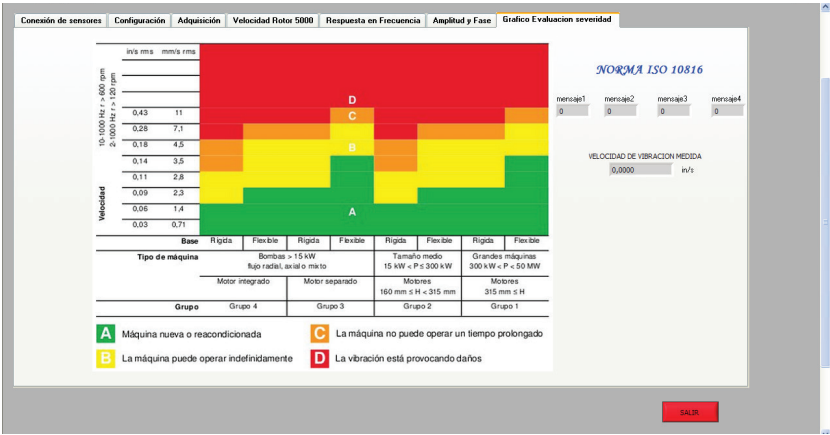
## Módulo de severidad de vibración

La práctica se realiza para la evaluación de severidad vibratoria, donde se hace una perturbación desbalanceando el sistema rotor-dinámico Rotor 5000 con un tornillo lo suficientemente pesado como para elevar los niveles de vibración a niveles intolerables por la máquina.

Para la elaboración del programa se aplicó la norma ISO 10816, donde se indica que para una máquina de este tipo los niveles permisibles o iniciales de montaje son 0,06 in/s a 0,11 in/s para un nivel intermedio, donde la máquina no presenta fallos pero se indica que la máquina ya tiene algún tiempo funcionando mal. En este punto se dice que la falla es del tipo incipiente 0,18 in/s, la condición de la máquina no es adecuada y no puede funcionar de manera continua. En este punto se dice que la falla es del tipo potencial, el valor límite para la vibración es cuando presenta falla funcional para valores por encima de 0,18 in/s.

La figura 10 muestra la descripción de la tabla de la norma ISO 10816 tomada del instrumento virtual para evaluar severidad vibratoria.

Figura 10  
Niveles tolerables e intolerables para análisis de severidad de vibración

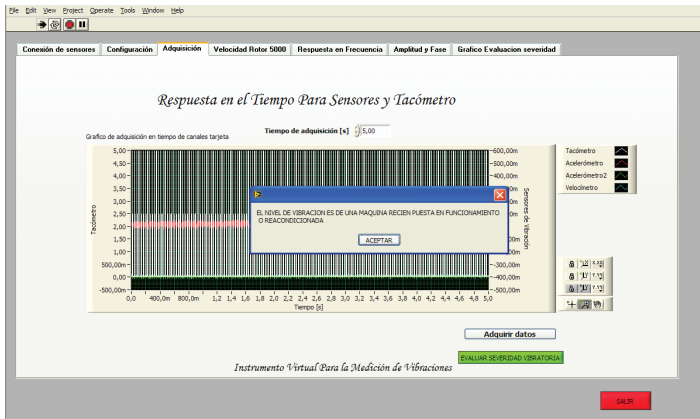


Fuente: los autores

En cada una de las siguientes figuras (11 y 12) se muestran los resultados para bajos niveles de vibración y niveles elevados perturbando el sistema con un tornillo de una masa elevada, desbalanceando el rotor para establecer cada una de las escalas de la norma ISO 10816.

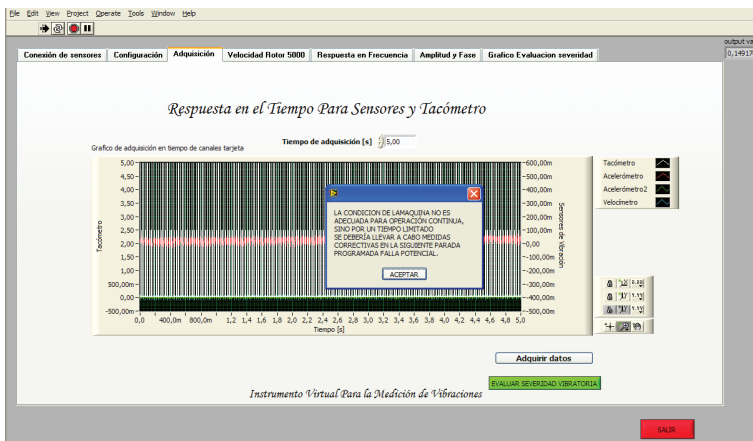


Figura 11  
Mensaje según el valor leído para la vibración  
en un rotor en perfecto estado



Fuente: los autores

Figura 12  
Mensaje según el valor leído para la vibración  
en un rotor con falla potencial



Fuente: los autores

## Conclusiones

En este trabajo se implementaron tres instrumentos virtuales para la medición y análisis de vibración, con los que se logró disminuir hasta un 70% las amplitudes de vibraciones por efectos del desbalance.

Se implementaron tres módulos para medir: balanceo en un plano, balanceo en dos planos y evaluación de severidad vibratoria. Estos demostraron ser funcionales para el banco de prueba Rotor 5000, aplicando métodos de balanceo comúnmente aplicados en la industria para evaluación de maquinaria rotativa.

La implementación realizada, permite establecer una conexión básica con lo que se puede encontrar por parte del estudiante y el mundo real visualizando datos de una máquina rotativa sencilla, obteniendo señales de vibración complejas y aplicando métodos clásicos de balanceo con análisis de vibración.

La portabilidad de la instrumentación y la tarjeta de adquisición de datos DaqPAD-6020E, permite hacer un instrumento portátil de análisis de vibraciones para cualquier tipo de rotor que necesite ser balanceado.

## Referencias bibliográficas

- Blanco, A., Beltrán, F., Silva, G. y Oliver, M. (2010). Active vibration control of a rotorbearing system based on dynamic stiffness. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (55), 125-133.
- Espino, P., Davinzón, Y., Olaguez, J., Lizárraga-Lizárraga, A., Benítez-García, I. y Núñez, J. (2017). Prototipo didáctico para la enseñanza de vibraciones mecánicas mediante el diseño de un banco de pruebas de desbalance y velocidad crítica. *Dyna*, 92, 395-398. doi:<http://dx.doi.org/10.6036/8101>
- Estupiñán, P. E., San Martín, C. y Solaligue, M. R. (2006). Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 14(1), 7 - 15. doi:10.4067/S0718-13372006000100002

- González, H., Cardona, J. y Monroy, G. (2005). Diseño de un banco de pruebas de desalineamiento y desbalanceo mecánico. *Scientia et Technica*, 11(28), 101-106.
- Hofmann. (2007). *Intelligent balancing solutions*. Recuperado de <http://www.hofmann-equilibrado.es/inicio.html>
- Krak, M., Heitkamp, K., Heitkamp, L., Masters, J. y Mikesell, D. (2011). Design and Construction of Vibration Test Stand. *ASEE North Central & Illinois-Indiana Conference*, pp. 1-13. American Society of Engineering Education. Recuperado de <http://people.cst.cmich.edu/yelam1k/asee/proceedings/2011/DATA/16-182-1-DR.pdf>
- Méndez-Adriani, J. (2000). *Balanceo dinámico de maquinaria rotativa*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Ocampo, J. R. (2013). Sistema de bajo costo para monitoreo de disturbios de vibración en máquinas rotatorias. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 2(2), 14-31.
- Olarte, W., Botero, M. y Cañon, B. (2010). Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica*, 16(45), 219-222.
- Raheja, D., Llinas, J., Nagi, R. y Romanowski, C. (2006). Data fusion/data mining-based architecture for condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, 44(14), 2869-2887. doi:10.1080/00207540600654509
- Sampaio, Rui y Silva, T. (2014). Unbalance and field balancing virtual labs. *2014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*, pp. 75-76. Porto. doi:10.1109/REV.2014.6784225
- Sánchez, H. y Pintor, J. (2004). Diseño y validación de un banco de ensayos para el análisis de vibraciones en rotores flexibles. *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, 3, 1721-1727.
- Silva, B., Soares, Á., Mathias, M., Prado, P. y Gonçalves, J. (2013). A computational approach to analyze unbalancing in rotational systems. *Academic Journals*, 8(29), 1396-1406. doi:DOI 10.5897/SRE2013.5578
- Silva-Juárez, A., Salazar-Pedraza, M. d. y Ponce-Mellado, J. (2016). Instrumento virtual para diagnosticar y corregir desbalance de maquinaria rotativa. *Revista de Tecnología e Innovación*, 3(7), 73-81.
- SpectraQuest. (2017). *Machinery Fault Simulator*. Recuperado de Product and solutions: <http://spectraquest.com/>

- Torres, M. y Quezada, A. (2016). Diseño de un sistema medidor de vibraciones para máquinas rotativas de 900 rpm hasta 8 4000 rpm. *Journal Boliviano de Ciencias*, 12(37), 23-28.
- V-TEK Associates. (2013). *We Provide Signal Acquisition and Processing Solutions for our customers*. Recuperado de <http://www.vtekassociates.com/index.html>



# Análisis de fallas del sistema de inyección electrónica de combustible Multec Delphi

---

Néstor Diego Rivera C.<sup>1</sup>

Iván Ernesto Fernández L.<sup>2</sup>

Hugo Santiago Inga I.<sup>3</sup>

Ángel Yasmany Aguilar R.<sup>4</sup>

## Resumen

La presente investigación analiza la influencia en la jerarquización del riesgo que provoca la presencia de un fallo en el sistema de inyección Multec Delphi, mediante el análisis de las emisiones contaminantes, consumo de combustible y el tiempo de inyección. El desarrollo del proyecto consta de diversas fases como la definición del alcance de la metodología del análisis de modos de falla, análisis la funcionalidad del sistema sometido a fallas, identificación de modos de falla, efectos de la falla, consecuencias de falla, jerarquización del riesgo y finalmente análisis de resultados. Los modos de fallas que presentan un mayor riesgo son evidenciados en la jerarquización, encontrándose estos en las partes superiores de las tablas. Este análisis permite identificar los elementos donde el mantenimiento tendrá que ser realizado con mayor eficiencia, mejorando la confiabilidad de los sistemas, medio ambiente y la seguridad del personal del involucrado. Se determina el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no combustionados (HC), tiempo de inyección y consumo de combustible como las variables a ser analizadas, para la cual se utiliza un método efectivo.

## Palabras clave

AMFE, árbol de fallos, efectos de falla, modos de falla.

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (ifernandez@est.ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (hinga@est.ups.edu.ec).
  - 4 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (aaguilar@ups.edu.ec).

**Abstract**

*The present investigation analyzes the influence in the hierarchy of the risk that causes the presence of a fault in the system of injection Multec Delphi, by the analysis of the pollutant emissions, fuel consumption and the time of injection. The development of the project consists of several phases such as the definition of the scope of the methodology of the analysis of failure modes, analysis of the functionality of the faulted system, identification of failure modes, failure effects, failure consequences, risk hierarchy And finally analysis of results. The failure modes that present a greater risk are evidenced in the hierarchy, these being in the upper parts of the tables. This analysis allows identifying the elements where maintenance will have to be performed with greater efficiency, improving the reliability of the systems, environment and the safety of the personnel involved. Carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons (HC) are determined; Injection time and fuel consumption are the variables to be analyzed, for which an effective method is used to achieve the purpose.*

**Keywords**

AMFE, fault tree, fault effects, fault modes.

**Introducción**

La falla en un elemento provoca que este no pueda cumplir la función para la cual fue diseñado, dificultando que el sistema funcione con normalidad. Con la ayuda del análisis de la metodología de modo y efecto de falla (FMEA por sus siglas en inglés) se puede identificar los modos de falla en un elemento o sistema.

En el sector automotriz, el AMEF no ha sido muy utilizado posiblemente por la falta de conocimiento acerca del tema. Siendo de vital importancia pues a más de garantizar un correcto funcionamiento de los equipos, permite conocer su confiabilidad, debido a que no es suficiente lograr solo un buen funcionamiento, sino también poder tener la capacidad de disminuir al mínimo la probabilidad de que un elemento falle y afecte el correcto funcionamiento de los motores durante su operación.

La falla de un elemento puede traer consigo altos costos económicos, perjudicar a la salud de las personas y provocar daños al medio ambiente, por esta razón es importante hacer un análisis en el que se pueda establecer las consecuencias de producirse un fallo en el sistema, ya que a partir de este análisis se pueden identificar las consecuencias que tiene una falla en la variación de la emisión de gases de escape, consumo de combustible y tiempo de inyección.

Aguilar (*et al.*, 2010) concluye que para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad se determina

que el análisis realizado es el cuello de botella para la planeación del mantenimiento, por lo que se debe entender claramente y ser aplicado por parte de personal con suficiente experiencia.

Antes de seleccionar una estrategia de mantención para un equipo es conveniente conocer los fenómenos que producen su degradación y falla (Pascual, 2002). Las fallas pueden ser clasificadas como:

- Fallas catastróficas. Contemplan las fallas repentinas y completas, tales como la ruptura de un componente mecánico o un corto circuito en un sistema eléctrico. Es difícil observar la degradación y por tanto no es posible establecer procedimientos preventivos.
- Fallas por cambios en parámetros. Son fenómenos tales como el desgaste mecánico, fricción, aumentos en la resistencia de componentes electrónicos. La degradación es gradual y puede ser observada directa o indirectamente (Pascual, 2002).

El principal interés del AMFE es resaltar los puntos críticos con el fin de eliminarlos o establecer un sistema preventivo (medidas correctoras) para evitar su aparición o minimizar sus consecuencias, con lo que se puede convertir en un riguroso procedimiento de detección de defectos potenciales si se aplica de manera sistemática (Bestratén *et al.*, 2004).

El desarrollo de un AMEF, de diseño o de procesos, utiliza un enfoque común para abordar:

- Fallas potenciales del producto o proceso para cumplir con expectativas.
- Consecuencias potenciales.
- Causas potenciales de modos de fallas.
- Aplicación de controles actuales.
- Niveles de riesgo.
- Reducción de riesgos.

Cada AMEF debiera asegurar que se ha dado atención a cada componente dentro del producto o ensamble. Para componentes o pro-



cesos críticos o relacionados con la seguridad se les debiera dar una alta prioridad (AIAG, 2008). Ramos (2015) realizó una matriz de riesgos para comenzar a mitigar, reducir, prevenir los puntos críticos más elevados de los modos de falla y buscar planes y/o acciones de mejora.

El AMEF de proceso que se implementa en este trabajo, debe ser efectuado durante la producción. Este es un documento que necesita ser revisado y actualizado con base al descubrimiento de nuevas formas de falla (Martínez, 2004).

## **Materiales y métodos**

### *Diseño experimental*

#### *Unidad experimental*

La investigación se desarrolla sobre el motor que se muestra en la figura 1, cuyas características y especificaciones técnicas se detallan en la tabla 1.

Figura 1  
Motor Luv 2.2



Fuente: los autores

Tabla 1  
Datos del motor Luv 2.2

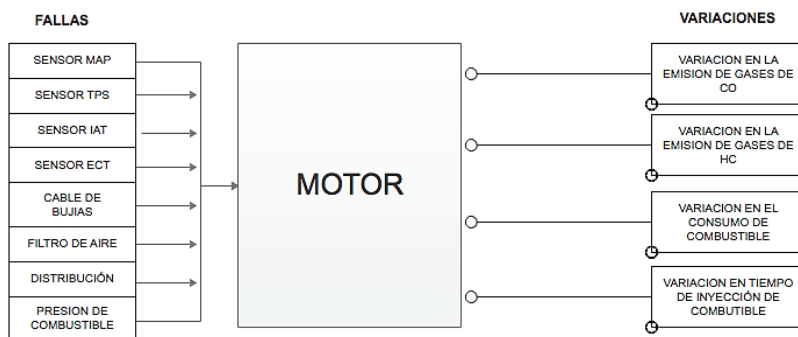
Especificación	Detalle
Motor	ISUZU
Modelo	C22NE
Cilindrada	2.2 L
Potencia máxima	111 hp a 4 800 rpm
Par máximo	125 lbft. a 3 800 rpm
Distribución	SOHC

Fuente: Los autores

### Modelo experimental

El modelo experimental que se utiliza para la adquisición de datos de consumo de combustible, tiempo de inyección y emisión de gases de escape, se muestra en la siguiente figura:

Figura 2  
Diagrama de variables del proceso



Fuente: Los autores

Mediante la adquisición de datos, se genera una matriz de fallos del sistema de inyección a gasolina Multec Delphi.

*Variables controlables*

Para el experimento se establecen las variables que se muestran a continuación:

Tabla 2  
Variables de controlables

Variable controlable	Rango
rpm	985 - 2 500
Temperatura del refrigerante	80 - 85° C
Temperatura de ingreso del aire	40 - 45° C

Fuente: Los autores

*Variables no controlables*

En este experimento se considera que la humedad, la temperatura ambiente y estado propio del motor, son los factores que varían de una prueba a otra.

*Variables de respuesta*

Se establecen como variables de respuesta al consumo de combustible, variación en el tiempo de inyección y emisión de gases contaminantes (HC y CO).

**Adquisición de datos**

Para la adquisición de la base de datos a utilizar en el desarrollo del proyecto se utilizan los equipos que se detallan a continuación.

1. Escáner automotriz. Se utiliza un escáner automotriz Ultrascan para poder controlar diferentes parámetros de funcionamiento del motor (temperatura del aire de IAT, temperatura del refrigerante ECT y revoluciones del motor). En la figura 3 se observa el escáner automotriz.

Figura 3  
Escáner automotriz



Fuente: Los autores

2. Analizador de gases. El analizador de gases QGA-6000 de la marca QROTECH, se muestra en la figura 4, mediante el cual se puede obtener el valor de los distintos gases de combustión como: CO, HC, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, además los valores de lambda y AFR.

Figura 4  
Analizador de gases QGA-6000



Fuente: Los autores

3. Regulador de presión de combustible. El regulador se utiliza para mantener la presión de combustible apropiada dentro del sistema de inyección, este control se realiza ubicando un manómetro cuya lectura debe estar acorde con la medida otorgada por el manual del fabricante, el mismo se muestra a continuación:

Figura 5  
Reglador de presión de combustible



Fuente: Los autores

4. Medidor de consumo de combustible. Para conocer la cantidad de combustible se ocupa el equipo Fuel Flow Master, proporcionado por la Universidad Politécnica Salesiana.

Figura 6  
Medidor de consumo de combustible



Fuente: Los autores

### Consideraciones para la adquisición de datos

1. Realizar un ABC del motor antes de encenderlo, para garantizar que el motor tenga un correcto funcionamiento.
2. Que el motor alcance la temperatura correcta de funcionamiento, la misma que debe ser alrededor de los 85° C.
3. Se procede a generar las fallas.
4. Verificar el correcto funcionamiento del analizador de gases, revisando el estado de los filtros, cañería y el purgado del mismo.

### Toma de datos

En las tablas 3 y 4 se presentan las bases de datos con valores a ralentí.

Tabla 3  
Toma de datos a ralentí

Características		Funcionamiento normal	Cables bujías	MAP	TPS	IAT	ECT
RPM	RPM	860	839	839	855	996	1005
ECT	° C	74	75	73	72	71	-40
IAT	° C	29	36	34	25	-40	27
MAP	KPa	26	27	10	26	24	23
TPS	%	6	6	6	6	6	6
t de inyección	ms	3,13	3,61	3,15	3,06	3,01	3,5
HC	ppm	126	651	1009	69	119	265
CO <sub>2</sub>	%	16,1	10,6	8,06	15,9	15,1	11
O <sub>2</sub>	%	2,08	7,17	12,77	3,09	3,6	3,06
Consumo	L/H	1,291	1,269	1,244	1,138	1,02	0,862

Fuente: Los autores

Tabla 4  
Toma de datos a ralenti

Características		Funcio- namiento normal	Filtro tapado	Presión menor	Presión mayor	Diente retra- sado	Diente adelan- tado
RPM	RPM	860	839	871	863	829	850
ECT	° C	74	74	77	73	69	74
IAT	° C	29	35	33	32	25	26
MAP	KPa	26	26	25	25	29	25
TPS	%	6	6	6	6	6	6
t de inyección	ms	3,13	3,09	4,3	2,8	3,08	2,98
HC	ppm	126	194	65	111	236	152
CO2	%	16,1	15	16	15,3	15,8	15,6
O2	%	2,08	3,44	4,89	5,43	4,69	5,52
Consumo	L/H	1,291	0,828	1,17	1,132	0,65	0,948

Fuente: Los autores

*Elemento y su función*

En la tabla 5 se muestra la función de cada elemento a ser analizado.

Tabla 5  
Elemento y su función

N-1	Elemento	Función
1	Sensor MAP	Encargado de informar a la ECU del vehículo la presión que se tiene dentro del colector de admisión.
2	Sensor TPS	Encargado de informar a la ECU del vehículo la posición de la mariposa de aceleración.
3	Sensor IAT	Encargado de informar a la ECU del vehículo la temperatura del aire de admisión.
4	Sensor ECT	Encargado de informar a la ECU del vehículo la temperatura del refrigerante del motor.
5	Filtro de aire	Encargado de filtrar o evitar el paso de impurezas hacia la cámara de combustión.

N-1	Elemento	Función
6	Distribución	Encargado de regular la entrada y salida de los gases en el cilindro.
7	Presión de combustible	Encargado de mantener o regular la presión del combustible antes de ser inyectado en la cámara.
8	Cable de bujías	Encargado de transferir el voltaje desde la bobina hacia las bujías.

Fuente: Los autores

### *Análisis funcional*

Es necesario identificar cada una de las funciones principales del elemento o sistema a ser analizado, un vez identificadas las funciones, se caracterizan las fallas funcionales, para lo cual es importante hacer notar e identificar que no todas las fallas pueden ser clasificadas como fallas funcionales, es decir no todas las fallas tienen como efecto directo la pérdida de la función. En la tabla 6 se presenta la falla funcional de cada elemento a ser analizado.

Tabla 6  
Análisis funcional

N.	Elemento	Falla funcional
1	Sensor MAP	El sensor MAP no informa a la ECU la presión.
		El sensor genera informaciones erróneas.
2	Sensor TPS	El sensor TPS no informa a la ECU de la apertura de la mariposa.
		El sensor genera informaciones erróneas.
3	Sensor IAT	El sensor IAT no informa a la ECU sobre la temperatura del aire de admisión.
		El sensor genera informaciones erróneas.
4	Sensor ECT	El sensor ECT no informa a la ECU sobre la temperatura del refrigerante.
		El sensor genera informaciones erróneas.

Fuente: Los autores



*Identificación de modos de falla*

Los modos de falla se identifican por cada falla funcional, pudiendo varios modos de falla dar origen a una falla funcional siendo esto una parte fundamental en el desarrollo de esta metodología, tal como se muestra en la tabla:

Tabla 7  
Identificación de modos de falla

Falla funcional	Modos de falla	Observaciones
El sensor MAP no informa a la ECU la presión	Sensor MAP dañado	Manipulación
	Sensor MAP defectuoso	Manipulación
	Cables desconectados o rotos	Manipulación
	Circuito abierto o cortocircuitado	Vibración-temperatura
	Alimentación del voltaje menor a lo establecido	ECU
	Alimentación del voltaje superior a lo establecido	ECU

Fuente: Los autores

*Efectos de las fallas*

Una vez identificados los modos de fallo que puedan generar la pérdida, es importante conocer los efectos que provoca cada fallo. En la tabla 8 se presentan los efectos de falla que genera el sensor de presión absoluta del colector de admisión (MAP).

Tabla 8  
Efectos de la falla

Modos de falla	Efectos de la falla
Sensor MAP Defectuoso	Encendido de la luz de falla
	Detonación y falla en el encendido
	Pérdida de potencia y potencia del motor
	Aumento del consumo de combustible

Modos de falla	Efectos de la falla
Cable desconectado o roto	Ahogamiento y jalones cuando se acelera
Circuito abierto o cortocircuitado	Marcha mínima inestable
Alimentación del voltaje menor a lo establecido	Humo negro, bujías sucias
Alimentación del voltaje superior a lo establecido	Reajusta mal el suministro de combustible
Sensor TPS defectuoso	Retraso a la aceleración o desaceleración
Circuito abierto o cortocircuitado	Posible calentamiento del catalizador
Alimentación del voltaje menor a lo establecido	Disminución del CO
Alimentación del voltaje superior a lo establecido	Excesiva emisión de HC

Fuente: Los autores

### *Consecuencias de la falla*

Con los efectos identificados procedemos a evaluar las consecuencias que causan los mismos, la tabla 9 muestra los efectos nos permiten conocer el comportamiento de la falla y la forma que esta se manifiesta.

Tabla 9  
Consecuencia de las fallas

Efectos de la falla	Consecuencias de falla
Encendido de la luz de falla	Mayor cantidad de emisión de gases contaminantes Mayor consumo de combustible
Detonación y falla en el encendido	
Pérdida de potencia y potencia del motor	
Aumento del consumo de combustible	
Ahogamiento y jalones cuando se acelera	
Marcha mínima inestable	
Humo negro, bujías sucias	
Reajusta mal el suministro de combustible	

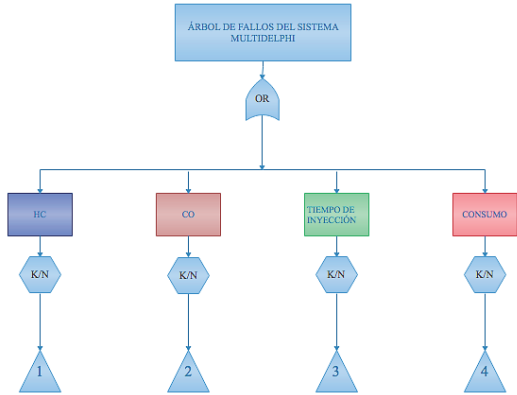
Efectos de la falla	Consecuencias de falla
Retraso a la aceleración o desaceleración	Funcionamiento incorrecto del motor Pérdida de potencia, inestable ralentí Daño psicológico al conductor
Posible calentamiento del catalizador	
Disminución del CO	
Excesiva emisión de HC	

Fuente: Los autores

Desarrollo del árbol de fallos

El árbol de fallos del sistema se realiza con la intención de conocer cómo afecta la falla de un elemento (sensor, filtro y cables de bujías), en el incremento de emisión de gases contaminantes, consumo de combustible y tiempo de inyección. En la figura 7 se presenta el árbol de fallos utilizado para evaluar los cuatro eventos principales que son el incremento de HC, incremento de CO, tiempo de inyección y consumo de combustible, con respecto a cada fallo de manera individual, combinación de dos fallos, y combinación de tres fallos.

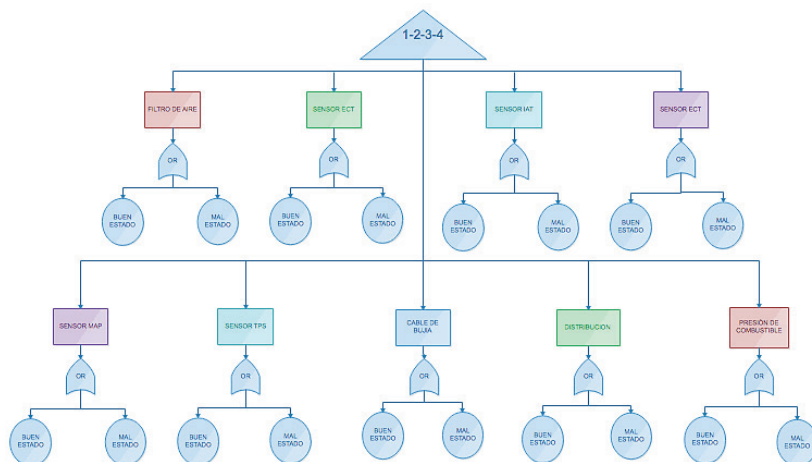
Figura 7  
Eventos principales



Fuente: Los autores

En la figura 8 se muestra el árbol de fallos para evaluar los eventos secundarios.

Figura 8  
Eventos secundarios



Fuente: Los autores

## Resultados y discusión

### *Jerarquización de la falla ralenti*

En la tabla 10 se presenta la jerarquización de la falla respecto al incremento de CO a ralenti, donde se tiene que una falla en el sensor ECT contribuye con una ponderación de 64,8%, siendo esta la que más afecta al incremento. El resto de elementos presentan contribuciones menores.

Tabla 10  
Jerarquización de la falla

Característica	Indisponibilidad	Contribución
ECT dañada	0,6482	0,648264826
Cable dañado	0,1558	0,155815582
Mayor presión	0,0476	0,04760476
Diente adelantado	0,0444	0,04440444
Filtro obstruido	0,039	0,0390039
Diente retrasado	0,0325	0,03250325
IAT dañada	0,0324	0,03240324

Fuente: Los autores

### *Jerarquización del riesgo*

La jerarquización mencionada en la metodología, consiste en evaluar la frecuencia de ocurrencia del modo de falla, es decir, la frecuencia con la que se daña un elemento ya sea un sensor, siendo esta frecuencia combinada con sus consecuencias; en este caso, el valor mayor de la categoría de consecuencia. La obtención del riesgo se da mediante la multiplicación de la frecuencia por la consecuencia más alta, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11  
Jerarquización de la falla

Falla	Frecuencia	Consecuencia personal	Consecuencia ambiental	Consecuencia en el sistema	Riesgo
Sensor MAP	Bajo	Alto	Medio	Medio	8
Sensor TPS	Medio	Medio	Medio	Medio	24
Sensor IAT	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	15
Sensor ECT	Medio	Alto	Medio	Medio	40
Filtro de aire	Alto	Medio	Alto	Medio	100
Cable de bujía	Alto	Alto	Bajo	Medio	56
Distribución	Medio	Alto	Bajo	Medio	48
Presión de combustible	Medio	Alto	Bajo	Medio	48

Fuente: Los autores

Respecto a la variación de emisiones de gases como CO y HC, las fallas que presentan mayor riesgo son el filtro de aire, seguido de un cable de bujías. Respecto a la variación del consumo de combustible, las fallas que presentan mayor variación es el filtro de aire, seguido de un cable de bujías. La variación en el tiempo de inyección presenta un alto riesgo al producirse un fallo en el filtro de aire y distribución.

## Conclusiones

El AMFE es una metodología importante que de forma clara y concisa nos permite entender cómo opera un elemento, pero sobre todo comprender la forma en la que este falla.

La mayor contribución al incremento en la emisión de gases de CO a ralentí es dado por la falla en el sensor ECT que contribuye con un 64,82% al incremento total, mientras que el incremento de CO a 2 500 rpm es dado por la falla en el cable de bujías que contribuye con un 82,3% al incremento total.

Mediante el análisis realizado se concluye que las fallas producidas en los elementos presentan una cierta relación. Debido a que estas contribuyen a una variación importante en el incremento o disminución de los gases contaminantes, tiempos de inyección y consumo de combustible.

## Recomendaciones

Se recomienda repetir el análisis realizado en otros motores con el fin de generalizar el conocimiento.

Los resultados obtenidos del análisis de FMEA permiten sugerir acciones correctivas cuyo objeto es eliminar los modos de fallo, los mismos que están basados en modificar los planes de mantenimiento que se dan e implementar nuevos planes y técnicas con el fin de disminuir al mínimo la falla del sistema.

En el proceso de análisis deben participar profesionales en análisis de riesgo, proceso y confiabilidad, entre otras, para potenciar la metodología propuesta.

## Referencias bibliográficas

- Aguilar, J., Torres, R. y Magaña, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 15-26.
- Alonso Rosales, J. F. (2008). *Análisis de modos y efectos de fallas potenciales*. Zaragoza: Cid Editor.
- Bestratén, M., Orriols, M. y Mata, C. (2004). *Análisis modal de fallos y efectos AMFE*. Ministerio del trabajo y asuntos sociales de España. Recuperado de [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp\\_679.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_679.pdf)
- Martínez, C. (2004). *Implementación de un análisis de modo y efecto de falla en una línea de manufactura para juguetes*. Nuevo León. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/1522/1/1020150046.PDF>
- Pascual, R. (2002). *Gestión moderna del mantenimiento*. Santiago: SciELO.
- Ramos, Á. (2015). *Actualización de formatos amef de acuerdo alternativas SOD, SD, SO*. Querétaro: Universidad Tecnológica de Querétaro.

# **Análisis de modos de falla, efectos y criticidad del sistema de inyección del motor C14NE**

Néstor Rivera<sup>1</sup>

Cristian García<sup>2</sup>

Yasmany Aguilar<sup>3</sup>

Fernando Tandazo<sup>4</sup>

## **Resumen**

Hoy en día es importante desarrollar investigaciones que permitan disminuir las emisiones contaminantes de los vehículos, además de reducir el consumo de combustible, punto de gran interés para los propietarios de vehículos. Es necesario destacar que las fallas que se analizan en este experimento no generan código de avería, de allí la importancia de implementar este tipo de estudios en los vehículos. Otra parte importante acerca de este tipo de análisis es que se reducen los costos de mantenimiento del motor, incrementando la fiabilidad y disponibilidad del mismo. Para el desarrollo de esta investigación se utiliza una tarjeta de adquisición de datos que permite obtener diversos comportamientos del motor con las fallas generadas en el mismo (incorrecta dosificación de combustible y problemas en el sistema de encendido), que luego son analizados estadísticamente. Posteriormente se aplica el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC), para determinar el índice de prioridad de riesgo (NPR), mismo que permite evaluar si es necesario intervenir en la falla o el vehículo puede seguir circulando sin problema, ya que la falla no representa un riesgo para el sistema. Los resultados obtenidos demuestran que la falla que genera un bajo voltaje de encendido es la que representa un mayor riesgo para el correcto funcionamiento del sistema y del motor.

## **Palabras clave**

AMFEC, consumo de combustible, disponibilidad, fiabilidad, NPR.

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (cgarcia@ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (aaguilar@ups.edu.ec).
  - 4 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (ltandazo@est.ups.edu.ec).



**Abstract**

Nowadays it is important to develop research that will reduce pollutant emissions from vehicles, in addition to reducing fuel consumption, a point of great interest for vehicle owners. It is necessary to emphasize that the failures that are analyzed in this experiment do not generate code of fault, of there the importance of implementing this type of studies in the vehicles. Another important part about this type of analysis is that the maintenance costs of the engine are reduced, increasing the reliability and availability of the same. For development, a data acquisition card is used to obtain various motor behavior with the faults generated in the same (incorrect fuel dosing and problems in the ignition system), which are then analyzed statistically. Later, the fault, effects and criticality modes analysis (AMFEC) is applied to determine the risk priority index (NPR), which allows to evaluate if it is necessary to intervene in the fault or the vehicle can continue to circulate without problem, since That failure does not pose a risk to the system. The results obtained demonstrate that the fault that generates a low voltage of ignition is the one that represents a greater risk for the correct operation of the system and the motor.

**Keywords**

AMFEC, availability, fuel consumption, NPR, reliability.

**Introducción**

En el medio la gestión de mantenimiento aplicada a motores de combustión interna generalmente se basa en recomendaciones del fabricante, en períodos fijos o en políticas de los talleres de servicio, sin considerar la condición y la fiabilidad que presentan dichos motores. En pocas ocasiones se recurre al uso de índices de mantenimiento debido a la falta de datos para su cálculo y análisis, lo que ocasiona incrementos en los costos de operación, debido al aumento del consumo de combustible que puede llegar hasta un 2,26% según indican Rivera y Chica (2015). Además, se puede tener una excesiva emisión de contaminantes en los gases de escape; en lo que concierne a hidrocarburos (HC) pueden aumentar hasta un 50,42% y el monóxido de carbono (CO) puede incrementar hasta 64,82% como mencionan Fernández e Inga (2017). También está la pérdida de prestaciones y en ocasiones paros del motor.

Es por eso que se ve la necesidad de implementar una herramienta basada en evidencia objetiva que determine la condición, los efectos y la criticidad de las fallas del sistema de inyección del motor, con lo que se logra optimizar la programación de las tareas de mantenimiento basados en la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema, con el propósito de mantener al motor siempre en funcionamiento.

El AMFEC considera los modos de falla de cada componente de un sistema y comprueba sus causas y efectos (Pascual, 2002). El AMFEC

fue desarrollado por primera vez como metodología formal de diseño en la década de 1960, por la industria aeroespacial, con sus evidentes requisitos de confiabilidad y seguridad. Desde entonces, se ha utilizado ampliamente para ayudar a garantizar la seguridad y la fiabilidad de los productos utilizados en una amplia gama de industrias: automotriz, nuclear y las industrias biomédicas (Gargama y Kumar, 2011).

Aguilar (*et al.*, 2010) empleó un análisis de riesgo aplicando la metodología de análisis de modos de falla, efectos y criticidad con el objeto de identificar los modos de falla que representan un mayor riesgo, para posteriormente seleccionar la mejor tarea de mantenimiento ya sea preventiva, predictiva, correctiva o en su caso acciones adicionales o complementarias. Por ejemplo, la falta de un estudio oficial y análisis detallado sobre indicadores de gestión de mantenimiento de una planta de generación, provoca que en ocasiones el mantenimiento se torne totalmente correctivo en lugar de preventivo o predictivo (Miño, 2015).

La versatilidad del AMFEC permite aplicarlo tanto en el desarrollo de productos como en modificaciones de diseño y para la optimización de procesos (Jimeno, 2013). El AMFEC se emplea para la búsqueda y evaluación de escenarios que puedan representar un impacto adverso para el proceso, identificando los escenarios de mayor riesgo y emitiendo acciones tendientes a minimizar los mismos (Mercedes, 2011).

Uno de los métodos para determinar la criticidad es mediante la cuantificación del riesgo. En este método se evalúa de manera subjetiva lo que corresponde a la severidad del efecto y una estimación de la probabilidad de su ocurrencia durante un periodo determinado de tiempo propuesto para el análisis (Adriano, 2016).

Llamas (2008) obtuvo resultados después de la aplicación del FMECA que indican que los modos de falla relacionados con la impermeabilidad del conjunto ocuparon el primer lugar en las etapas de diseño y construcción de la instalación. En segundo lugar se ubicaron los modos de falla referidos a la estabilidad, que lideran las etapas de diseño y operación.

## Materiales y métodos

### Método experimental

#### *Motor de pruebas*

El motor de pruebas que se utiliza para obtener los datos para desarrollar el experimento es un C14NE:

Figura 1  
Motor de pruebas



Fuente: los autores

Las características del motor de pruebas se muestran en la tabla 1:

Tabla 1  
Características del motor de pruebas

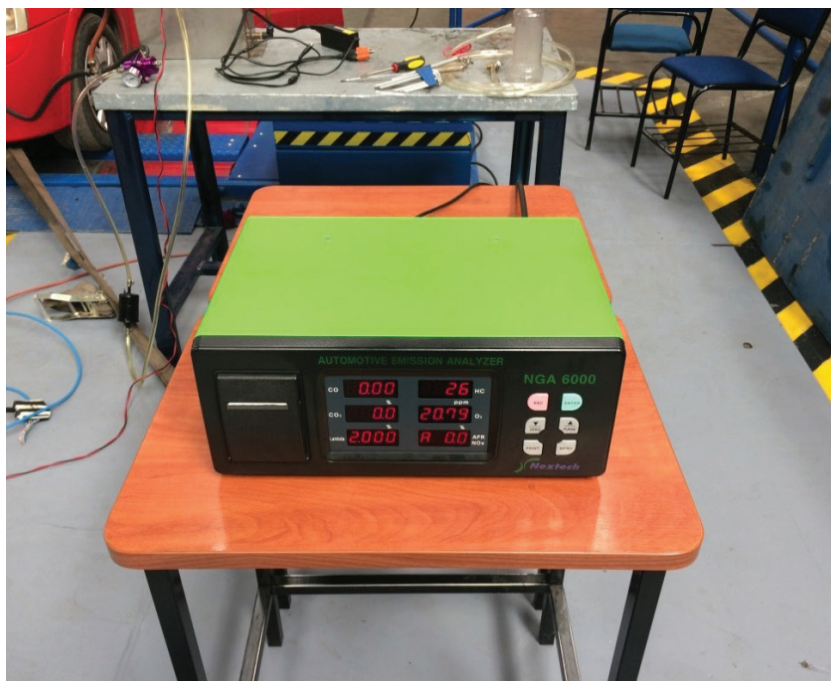
Especificación	Detalle
Potencia máxima	83,7 HP @ 6 000 rpm
Torque	113,56 N.m @ 3 000 rpm
Cilindrada	1 388 cc
Sistema de inyección	Multipunto
Consumo de combustible	6,8l/100 km
Distribución	SOHC

Fuente: los autores

### *Analizador de gases*

El equipo utilizado para analizar la concentración de emisiones contaminantes en los gases de escape del vehículo en estudio es un analizador de gases NGA 6000, con certificado de calibración vigente que se muestra en la figura 2, el cual realiza la medición de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), mediante el método no dispersivo de absorción de infrarrojos (NDIR); mientras que la medición de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y óxidos nitrosos ( $\text{NOx}$ ) se da por célula electroquímica. Las características del analizador de gases se muestran en la tabla 2.

Figura 2  
Analizador de gases



Fuente: los autores

Tabla 2  
Características del analizador de gases

Característica	Símbolo	Rango	Sensibilidad	Unidad
Monóxido de carbono	CO	0,00 - 0,99	0,01	%
Hidrocarburos	HC	0 - 9999	1	ppm
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,0 - 20	0,10	%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,0 - 25	0,01	%
Óxidos nitrosos	NOx	0 - 5000	1	ppm
Lambda	$\lambda$	0 - 2,000	0,001	—
Relación aire/combustible	AFR	0,0 - 99,0	0,1	—

Fuente: Nextech, 2017

### *Tarjeta de adquisición de datos*

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que se utiliza en el experimento es la USB 6008 de National Instrument, la misma que se ilustra en la figura 3, y sus características se detallan en la tabla 3.

Figura 3  
Tarjeta de adquisición de datos



Fuente: National Instrument Corporation, 2017

Tabla 3  
Características de la tarjeta de adquisición de datos

Especificación	Detalle
Tipo de medida	Voltaje
Canales de entrada analógica	8
Resolución de entrada y salida analógica	12 bits
Rango de voltaje máximo en la entrada analógica	-10 V hasta 10 V
Precisión del voltaje máximo en la entrada y salida analógica	7 mV
Canales de salida analógica	2
Rango de voltaje máximo en la salida analógica	0 V hasta 5 V
Capacidad de corriente total	10 mA

Fuente: National Instrument Corporation, 2017

## Metodología

### *Adquisición de datos*

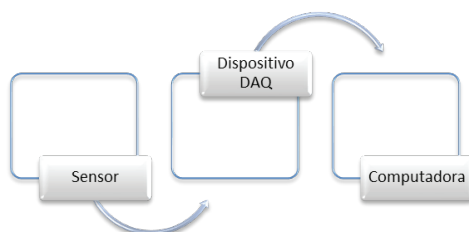
La adquisición de datos es el proceso de medir con una computadora un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión, etc.

### *Sistema de adquisición de datos*

Un sistema de adquisición de datos consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una computadora con software programable, como se muestra en la figura siguiente:

Figura 4  
Sistema de adquisición de datos





Fuente: National Instrument Corporation, 2017

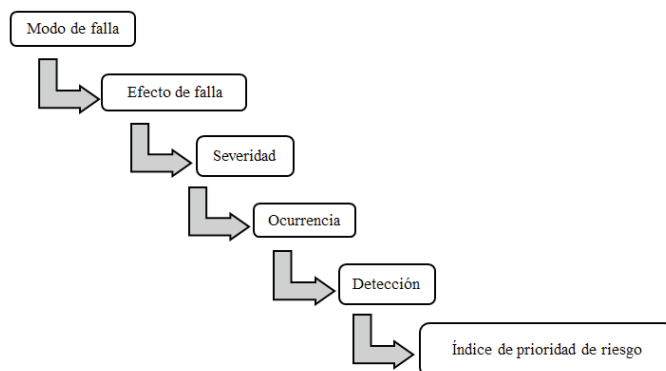
### *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad*

El AMFEC es una metodología que tiene como objetivo identificar los modos de falla que representan un mayor riesgo, para posteriormente seleccionar la mejor tarea de mantenimiento a utilizar, ya sea preventiva, predictiva o correctiva.

#### *Técnica AMFEC*

En la figura 5 se muestra el proceso para aplicar la técnica AMFEC en un sistema.

Figura 5  
Proceso para aplicar técnica AMFEC



Fuente: los autores

### *Modo de falla*

El concepto “modo de falla” es usado para referirse a las posibles maneras en que un componente puede fallar, un componente puede tener uno o más modos de falla.

### *Efecto de falla*

Los efectos de fallo describen lo que sucedería si no se hace ninguna tarea específica para anticipar, prevenir o detectar el fallo.

### *Severidad*

La severidad indica cuán grave es la falla que se identifica en el sistema, lo cual es subjetivo dependiendo de la persona que clasifique el daño.

### *Ocurrencia*

La ocurrencia muestra con qué frecuencia se da la falla en el sistema en un determinado tiempo, el término puede tomarse como probabilidad de que ocurra o no una falla.

### *Detección*

La detección indica qué tan probable es que se localice la falla en el sistema, si no se detecta la falla, es probable que cause un daño mayor al sistema o a su vez una detención del mismo.

### *Índice de prioridad de riesgo*

El índice de prioridad de riesgo (NPR) es el resultado de la multiplicación de los índices de la severidad, ocurrencia y detección. En la tabla 4 se muestra un resumen para desarrollar el AMFEC, donde hay los valores para la severidad, ocurrencia y detección.



Tabla 4  
Valores para la severidad, ocurrencia y detección

Severidad		Ocurrencia		Detección		NPR	
Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor
Muy baja	1	Muy baja	1	Muy alta	1	Muy baja	—
Baja	2 - 3	Baja	2 - 3	Alta	2 - 3	Baja	1 - 50
Moderada	4 - 6	Moderada	4 - 5	Moderada	4 - 6	Moderada	51 - 100
Alta	7 - 8	Alta	6 - 8	Baja	7 - 8	Alta	101 - 200
Muy alta	9 - 10	Muy alta	9 - 10	Muy baja	9 - 10	Muy alta	201 - 1000

Fuente: Rodríguez, 2012

Rodríguez (2012) indica que si el valor de NPR es superior a 100, se debe intervenir en el sistema realizando la tarea de mantenimiento respectivo, en cambio si el valor de NPR es inferior a 100 no es necesario intervenir, salvo que los cambios fueran fáciles de introducir en el sistema.

### *Fallas generadas en el motor*

Los tipos de fallas generadas en el motor en estudio se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5  
Fallas generadas en el motor

Tipo de falla	Condición de la falla	Descripción de la falla
Falla 1	Dosado rico	Incorrecto desempeño de sensores
		Elevada presión de combustible
		Inyector defectuoso
		Regulador de presión defectuoso
		Filtro de aire tapado
		Conducto de retorno de combustible obstruido
Falla 2	Dosado pobre	Incorrecto desempeño de sensores
		Baja presión de combustible

Tipo de falla	Condición de la falla	Descripción de la falla
Falla 3	Bajo voltaje de encendido	Inyector defectuoso
		Regulador de presión defectuoso
		Bujías desgastadas
		Cables de encendido defectuosos
		Bobina defectuoso
		Cableado de sensores defectuosos

Fuente: los autores

Cabe recalcar que se tomaron datos con el motor en buen funcionamiento y en mal estado con las fallas generadas que se detallaron anteriormente. Se disponen de 600 000 datos en diferentes estados de funcionamiento del motor, lo cual permite realizar un diseño experimental para conocer el comportamiento del motor con cada una de las fallas y de esa manera conocer los valores de NPR que permitan decidir la tarea de mantenimiento a realizar en el vehículo.

## Resultados y discusión

### *Validación de datos*

Para comprobar los efectos de la aleatorización en la realización de las corridas experimentales se grafican los residuos del NPR, salida importante que se analiza en el estudio. En la figura 6 se muestra la gráfica de residuos el NPR, donde se puede apreciar la inexistencia de patrones definidos. Además, se observa que no existen datos asimétricos y no hay valores atípicos en los datos.

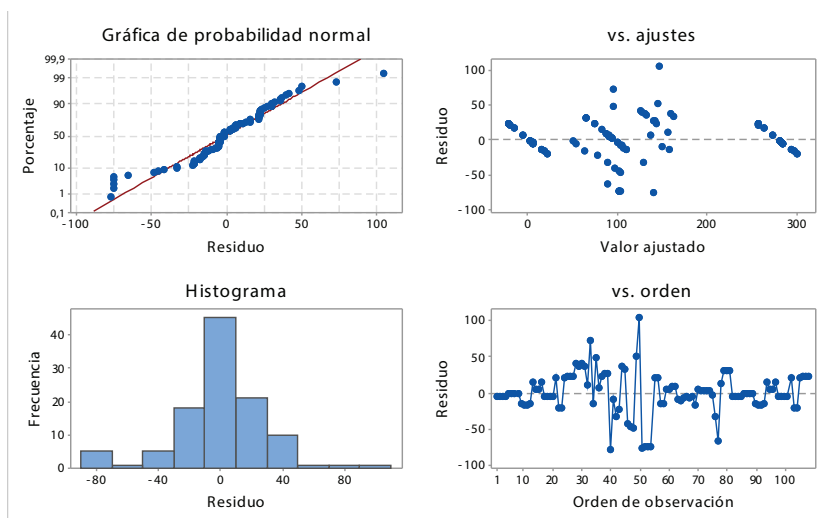
### *Representación gráfica y análisis*

#### *Índice de prioridad de riesgo frente a las fallas generadas*

En la figura 7 se muestra una gráfica de intervalos del NPR, donde se observa que cuando no existe falla en el sistema, el valor de NPR es

cero; en cambio cuando se da alguna de las tres fallas que se han explicado anteriormente, el NPR aumenta superando así el valor de 100 para el caso de la falla 1 y 3, donde ya es necesario intervenir en el sistema para evitar fallas graves y problemas futuros en el funcionamiento del motor. Además, analizando la gráfica se puede evidenciar que la falla 3 es la que genera un alto valor de NPR, superando a las fallas 1 y 2 en un valor considerable a tener en cuenta a la hora de tomar una decisión para realizar el mantenimiento.

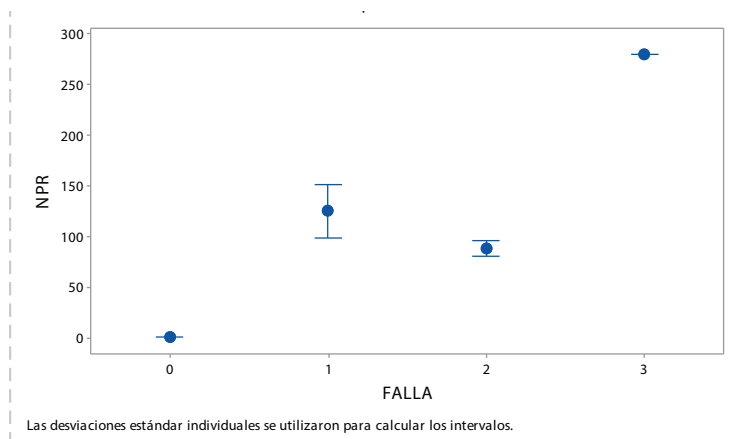
Figura 6  
Gráfica de residuos para el NPR



Fuente: los autores

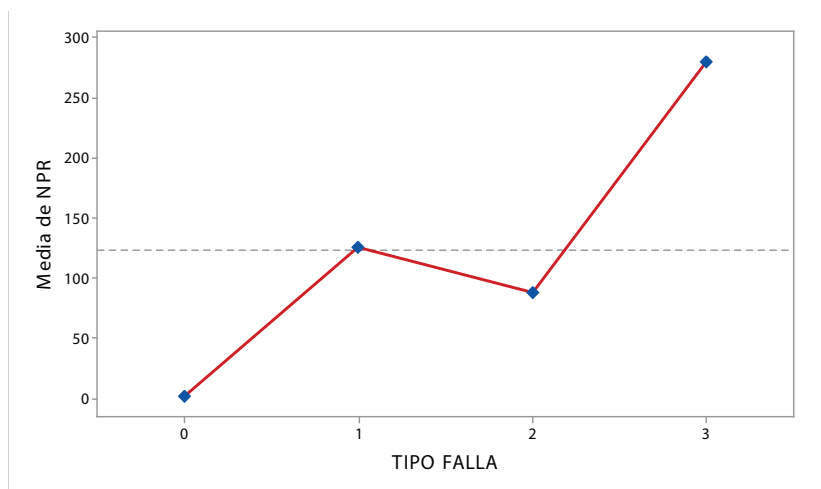
El comportamiento del NPR respecto de los factores considerados en la corrida experimental se representa en el diagrama de efectos principales que se muestra en la figura 8.

Figura 7  
Gráfica de intervalos del NPR



Fuente: los autores

Figura 8  
Diagrama de efectos principales para el NPR

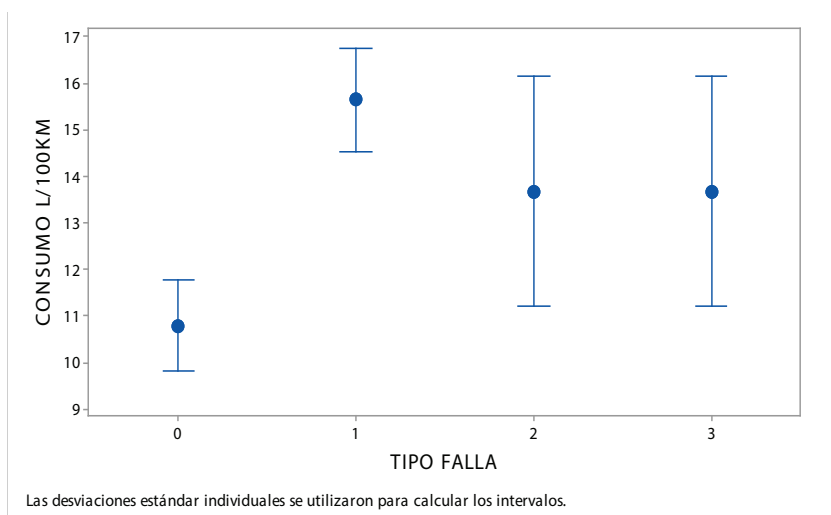


Fuente: los autores

### *Consumo de combustible l/100km frente a las fallas generadas*

En la figura 9 se muestra una gráfica de intervalos del consumo de combustible en l/100km, donde se observa que cuando no existe falla en el sistema, el consumo de combustible es normal o relativamente bajo; en cambio cuando se da alguna de las tres fallas, el consumo sube considerablemente y por ende es necesario intervenir en el sistema, realizando una tarea de mantenimiento. Se puede evidenciar que la falla 1 es la que genera mayor consumo de combustible y las fallas 2 y 3 no generan tanto como en la 1, pero su consumo sí es superior que cuando existe falla.

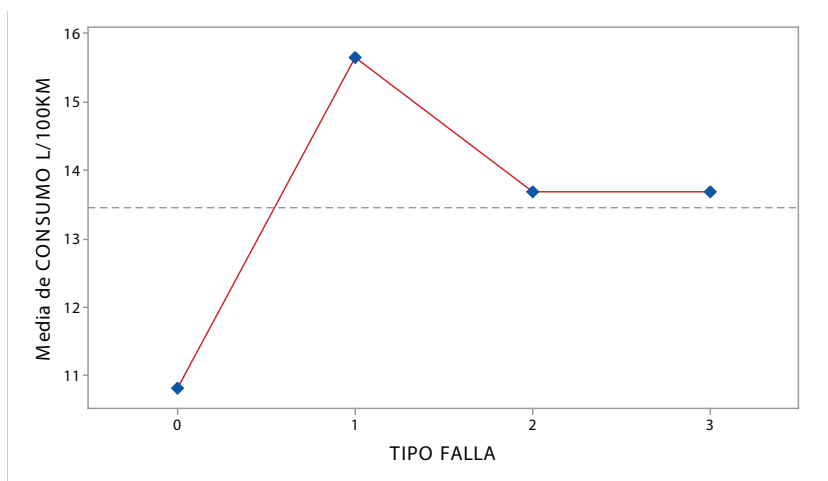
Figura 9  
Gráfica de intervalos del consumo de combustible



Fuente: los autores

El comportamiento del consumo de combustible en l/100km respecto de los factores considerados en la corrida experimental se representa en el diagrama de efectos principales de la siguiente figura:

Figura 10  
Diagrama de efectos principales para el consumo de combustible



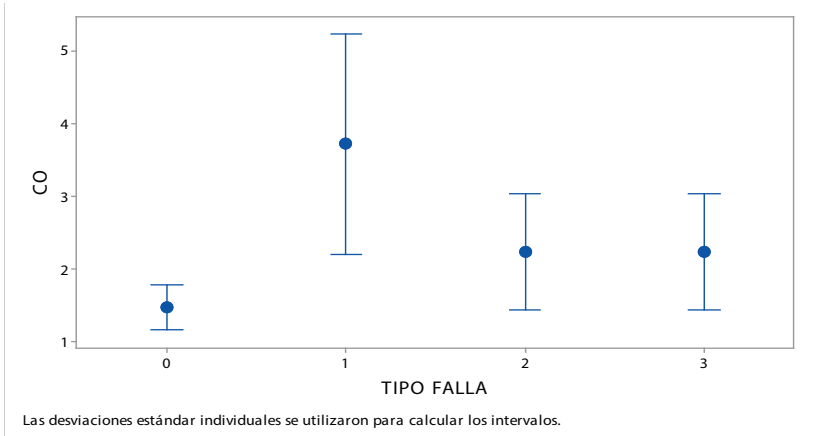
Fuente: los autores

### *Emisiones de CO frente a las fallas generadas*

En la figura 11 se muestra una gráfica de intervalos de las emisiones de CO, donde se observa que cuando no existe falla en el sistema, los valores de CO son normales o bajos; en cambio cuando se da alguna de las tres fallas, la emisión de CO se eleva y por ende es necesario intervenir en el sistema, realizando una tarea de mantenimiento. Se puede evidenciar que la falla 1 es la que genera mayor CO y las fallas 2 y 3 no elevan tanto como en la 1, pero es mayor que cuando no existe falla.

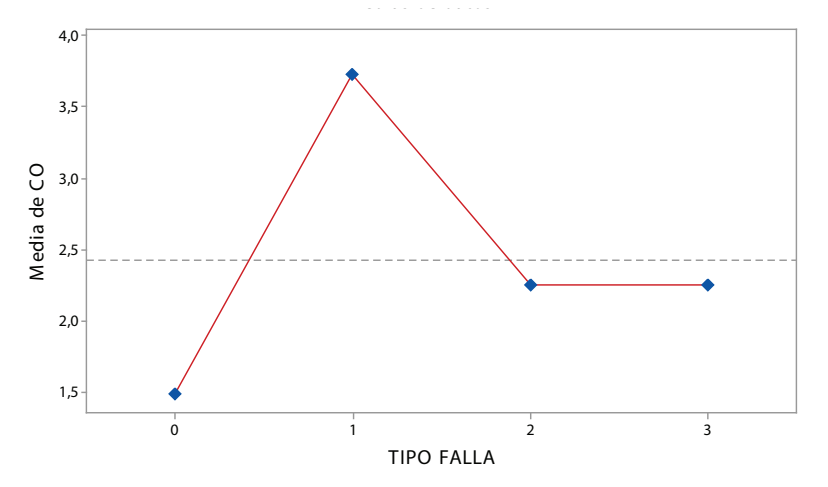
El comportamiento de las emisiones de CO respecto de los factores considerados en la corrida experimental se representa en el diagrama de efectos principales figura 12.

Figura 11  
Gráfica de intervalos de las emisiones de CO



Fuente: los autores

Figura 12  
Diagrama de efectos principales para las emisiones de CO

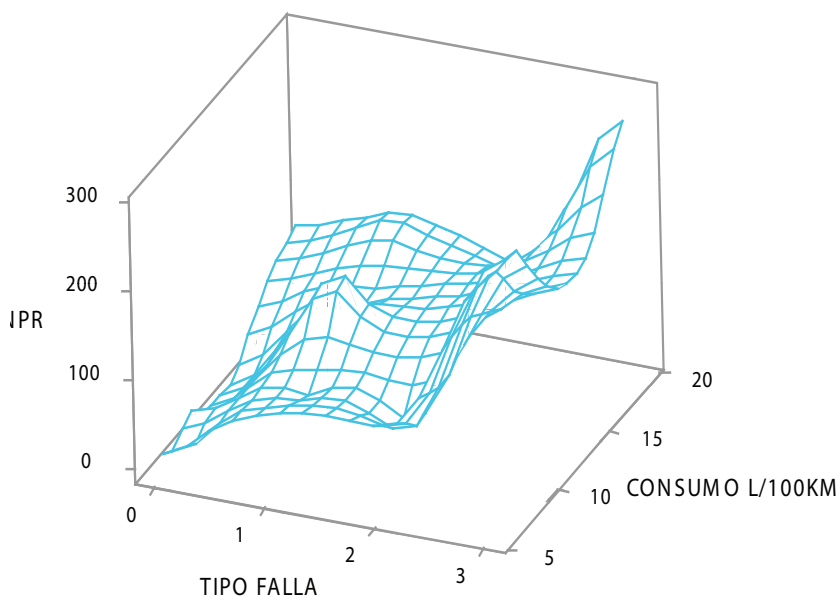


Fuente: los autores

*Superficie de respuesta del NPR frente al tipo de falla y consumo*

En la figura 13 se observa cómo cambia el NPR frente a las diferentes fallas generadas y al consumo de combustible.

Figura 13  
NPR vs. Tipo de falla (consumo)

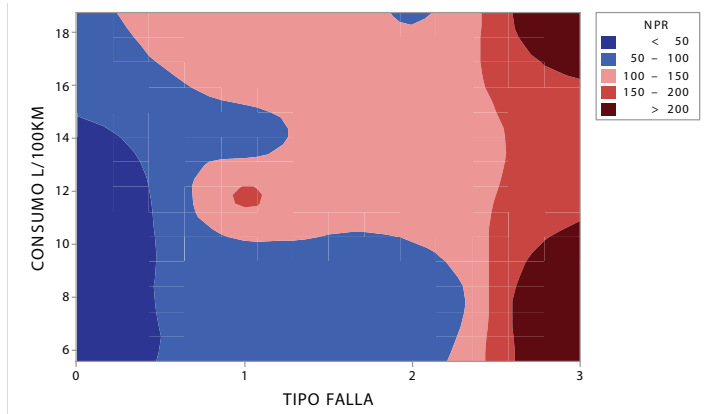


Fuente: los autores

La gráfica de contorno que se muestra en la figura 14, demuestra que el valor de NPR es superior a 100 para las fallas 1 y 3, por ende, se debe llevar a cabo la tarea de mantenimiento cuando se den estas averías.



Figura 14  
NPR vs tipo de falla y consumo

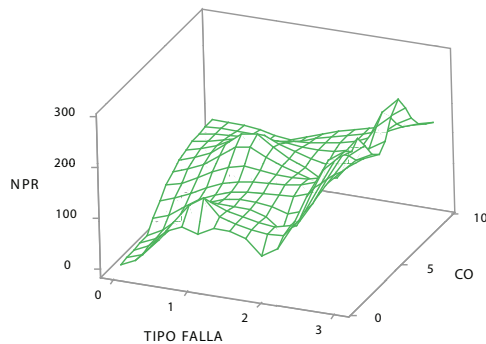


Fuente: los autores

### *Superficie de respuesta del NPR frente al tipo de falla y emisión de CO*

En la figura 14 se observa cómo cambia el NPR frente a las diferentes fallas generadas y a la emisión de CO.

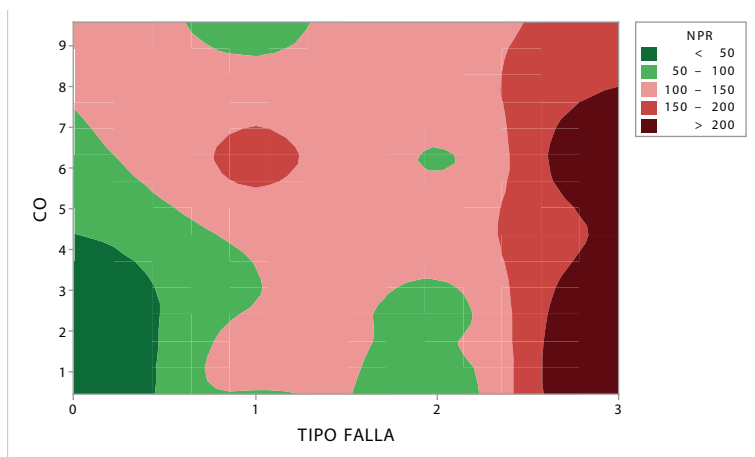
Figura 15  
NPR vs. Tipo de falla (emisión de CO)



Fuente: los autores

La gráfica de contorno que se muestra en la figura 16, demuestra que el valor de NPR es superior a 100 para las fallas 1 y 3, por ende se debe llevar acabo la tarea de mantenimiento cuando se den estas averías.

Figura 16  
NPR vs. Tipo de falla y emisión de CO



Fuente: los autores

## Conclusiones

Cuando se genera una falla en el sistema de inyección, existen consecuencias en las emisiones contaminantes y en el consumo de combustible, además de que esa falla puede generar mayores problemas de funcionamiento del motor, por ende, es necesario intervenir para evitar futuras averías en el motor.

Los resultados del estudio muestran que la falla 1 genera un valor de NPR de 125, donde es necesario intervenir realizando la actividad de mantenimiento preventivo para disminuir la posibilidad de que se generen daños mayores en el motor, además de reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO.

La falla 2 genera un valor de NPR de 87, donde no es necesario que se lleve a cabo el mantenimiento, debido a que el valor es inferior a 100 como indica la literatura analizada.

En lo que concierne a la falla 3, el valor de NPR se eleva hasta 280, y en base al estudio realizado esta avería es la más crítica, por lo tanto se debe efectuar el mantenimiento en el vehículo de inmediato y así evitar que se den futuros daños y detenciones del motor.

## Recomendaciones

Los valores de NPR basados en la severidad, ocurrencia y detección para las fallas generadas en este estudio, muestran resultados muy buenos para tomar decisiones respecto al mantenimiento que se debe realizar en el vehículo, pero se podría ampliar a más averías, es por eso que se recomienda utilizar sistemas inteligentes en línea que permitan aumentar la disponibilidad del motor.

## Referencias bibliográficas

- Adriano, C. (2016). *Desarrollo de un modelo de análisis de fallas, jerarquización de activos críticos y riesgos para el mejoramiento de la eficiencia en la gestión del mantenimiento de la estación de bombeo amazonas de OCP Ecuador*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Aguilar, J., Torres, R. y Magaña, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 15-26.
- Fernández, I. e Inga, S. (2017). *Análisis de modos de falla del sistema de inyección electrónica de combustible Multec Delphi*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Gargama, H. y Kumar, S. (2011). Criticality Assessment Models for Failure Mode Effects and Criticality Analysis Using Fuzzy Logic. *Transactions On Reliability*, 102-110.
- Jimeno, J. (febrero, 2013). *pdcahome*. Recuperado de <https://www.pdcahome.com/3891/amfe-guia-de-uso-del-analisis-modal-de-fallos-y-efectos/>

- Llamas, S. (2008). *Análisis de modos de falla y criticidad de efectos en sistemas de contención de lixiviados*. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.
- Mercedes, T. D. (2011). *Diseño de plan de mantenimiento predictivo para la línea de producción*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Miño, M. (2015). *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) de un motor de combustión interna Wartsila 18V32LNGD*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- National Instrument Corporation. (2017). *National Instrument Corporation*. Recuperado de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Nextech. (2017). *Alibaba*. Recuperado de [http://kr107810564.fm.alibaba.com/product/109860365-0/NGA\\_6000\\_GAS\\_ANALYZER\\_.html?spm=a2700.8304367.0.0.43f34f04jhnySZ](http://kr107810564.fm.alibaba.com/product/109860365-0/NGA_6000_GAS_ANALYZER_.html?spm=a2700.8304367.0.0.43f34f04jhnySZ)
- Pascual, R. (2002). *Gestión moderna del mantenimiento*. Santiago: Universidad de Chile.
- Rivera, N. y Chica, F. (2015). *Estudio del comportamiento de un motor ciclo Otto de inyección electrónica respecto a la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de Cuenca*. Quito: Nacional.
- Rodríguez, J. (2012). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto*. Málaga: IC-editorial.



# Aplicaciones de máquinas de soporte vectorial en el diagnóstico de motores de combustión

---

Néstor D. Rivera Campoverde<sup>1</sup>

Christian X. Barreto Cajamarca<sup>2</sup>

Luis P. Zhunio Lituma<sup>3</sup>

## Resumen

El presente trabajo muestra el procedimiento llevado a cabo para el entrenamiento y validación de un algoritmo que predice las averías en diferentes componentes del motor de combustión interna, cuyo diagnóstico suele generar tiempos excesivos de mantenimiento debido a que no siempre es acertado, ya sea por falta de equipos o escasez de conocimientos que ayuden a interpretar la existencia de dicho fallo. Para la generación del algoritmo se presentan varias etapas, iniciando por la clasificación de cuáles son los datos que mejor distingan un fallo de otro, estos fallos están relacionados con la calibración entre electrodos de la bujía, el porcentaje de apertura del inyector y la presión de la bomba de combustible. Seguidamente se ha entrenado una máquina de clasificación que, en base al aprendizaje, ayude a predecir de manera adecuada la existencia y la ubicación de la avería en cuestión. Finalmente, se presenta un análisis de los porcentajes de confiabilidad del algoritmo realizado mediante el uso de las SVM al aplicar el mismo en el diagnóstico de fallas en el motor, en donde se observa que se puede obtener una confiabilidad del 96,5%, con un error porcentual de 3,448% correspondiente a una sola falla mal clasificada.

## Palabras clave

Diagnóstico en línea, algoritmo, máquinas de soporte vectorial (SVM), aprendizaje supervisado, matriz de confusión, curva ROC.

## Abstract

*The present work shows the procedure realized for the training and validation of an algorithm that predict, the damage in the internal combustion engine's different components and whose diagnosis uses to generate excessive times of maintenance. Several stages, which show up for the generation of the*

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (cbarreto@est.ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (lzhunio@est.ups.edu.ec).

*algorithm music consists in the classification of which ones the data that better they interpret and that tell a failure from other, these failures are related to the calibration between electrodes of the spark plug, the percentage of opening of the injector and the pressure of the fuel pump. Straightaway has trained a machine of classification than, on the basis of saying process of learning, help to predict of adequate way the existence and the position of the damage in point. Finally there appears an analysis of the percentages of reliability of the algorithm realized by means of the use of the SVM on having applied it in the diagnosis of flaws in the engine, where it is observed that it is possible to obtain a reliability of 96.5 %, with a percentage error of 3,448 % corresponding to only one it fails badly classified.*

**Keywords**

*Online diagnostics, algorithms, support vector machines (SVM), supervised learning, confusion matrix, ROC curve.*

## Introducción

Los motores de combustión interna (MCI) son ampliamente utilizados en los vehículos de hoy en día debido a la gran autonomía y economía de combustible que ofrecen. Sin embargo, al ser un conjunto de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos, están propensos a sufrir averías cuyo diagnóstico puede facilitarse en función del conocimiento, equipos y métodos que se apliquen para llegar a la detección de la avería.

En la actualidad, gracias a los avances en nuevas tecnologías dentro del campo de las herramientas de aprendizaje y clasificación, se puede desarrollar algoritmos que, en base a valores característicos de entrada, generen una decisión equivalente a la falla que se presente en un determinado momento. Muchos estudios han sido realizados para predecir varios parámetros de funcionamiento del motor, algunos de estos centrados en sus condiciones de funcionamiento, otros en gases de escape y el resto enfocado en ambos (Najafi *et al.*, 2016).

Las máquinas de soporte vectorial (SVM) representan un método de aprendizaje relativamente nuevo y computacional basado en la teoría estadística de aprendizaje y pueden hacer las funciones de sistemas inteligentes. En el monitoreo de la condición de la máquina y el problema de diagnóstico de falla, las SVM son empleadas para reconocer patrones especiales de la señal adquirida y seguidamente clasificar estos patrones según la ocurrencia de falla en el motor (Achmad y Bo-Sunk, 2014).

En general, las SVM pueden servir para resolver problemas simples de clasificación binaria, es decir, que generen únicamente dos tipos de respuesta a su salida, pero para el diagnóstico de fallas no siempre se tendrán solo dos clases de datos, es decir, se puede clasificar el estado de la maquina entre sano y en falla, pero además evaluar la severidad de la falla en cuestión, es decir, una vez diagnosticado un estado anómalo, se debe reconocer qué tipo de falla es o cuál de los diferentes elementos que forman un sistema corresponde a la existencia de la falla (Ortiz, 2014).

Sin duda, el beneficio medioambiental que representa la detección temprana de una avería es significativo debido a la reducción de los gases contaminantes que emite un vehículo que presenta una combustión deficiente causada por determinada falla en uno de sus sistemas. Por lo tanto, al realizar un diagnóstico acertado, se consigue mejorar la capacidad operativa del motor, reducir los tiempos de mantenimiento y mantener las emisiones contaminantes en un rango mínimo, mejorando la calidad del aire y mitigando los problemas de salud que traen consigo la exposición a dichos gases.

**Materiales y métodos**

*Unidad experimental*

El motor empleado para realizar el experimento corresponde a una maqueta de un Hyundai Accent DOHC 1.5L con las siguientes características técnicas:

Tabla 1  
Datos técnicos del motor

Motor Hyundai Accent	
Motor	Alpha II
Modelo	G4FK
Cilindrada	1.5 L
Número de cilindros	4



Motor Hyundai Accent	
Potencia máxima	74 kW @ 6 000 rpm
Torque máximo	134 Nm @ 4 000 rpm
Relación de compresión	9,5 : 1
Distribución	DOHC

Fuente: los autores

### Marco metodológico

El objetivo es conseguir un diagnóstico fiable mediante la adquisición, tratamiento y posterior clasificación de datos obtenidos (Gómez García *et al.*, 2016). El aporte en este trabajo se centra en conseguir una clasificación de datos previamente obtenidos que sirva como punto de partida para el diagnóstico de fallas y veredictos de fiabilidad en motores de combustión interna.

La mayoría de los problemas de clasificación tienen regiones de decisión complicadas, es decir, no son linealmente separables por lo que es necesario emplear un método que permita generalizar el uso de las SVM para este tipo de problemas. La metodología consiste en un procedimiento denominado Kernel Trick, la idea es proyectar un conjunto de datos pertenecientes a una dimensión  $n$  dada, hacia un espacio de dimensión superior aplicando una función Kernel, y a partir del nuevo espacio se operarán los datos como si se tratase de un problema de tipo lineal, resolviendo el problema sin considerar la dimensionalidad de los datos (Sánchez Anzola, 2015).

En base a esto no todos los casos en los que las máquinas de soporte vectorial se aplican otorgan una resolución simple en la separación o clasificación de datos. Existen en la actualidad diversas herramientas computacionales que utilizan SVM basadas en modelos tipo Kernel (Kernel Machines) como método de clasificación, las cuales otorgan soluciones a problemas de tipo lineal o no lineal.

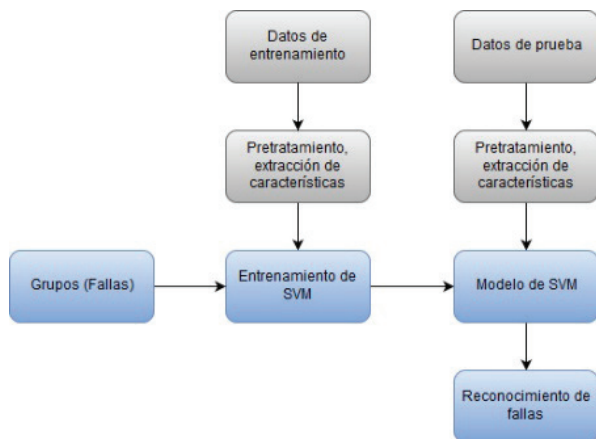
Como lo menciona Jabbour (*et al.*, 2012), una SVM es un clasificador binario y al tener varias clases en un mismo espacio, como el presente

caso de estudio, la solución es convertir el problema en varias clasificaciones binarias. Se utilizará una clasificación de tipo uno versus uno, donde se hacen comparaciones de las clases de dos en dos de manera que al final se compararán todas las clases entre sí (Gómez García *et al.*, 2016).

### *Proceso de reconocimiento de fallas*

Se requieren datos de entrada para el proceso de aprendizaje de la SVM, así como datos de prueba una vez terminada la etapa de aprendizaje o entrenamiento para la verificación del modelo SVM desarrollado. Estos datos deben tener un proceso de pre-tratamiento o extracción de características que demuestren que son fiables. Se requiere, además, definir los grupos o clases a los que pertenecen los datos, se entiende que las SVM necesitan información para aprender y generar un modelo de reconocimiento, esto se ve en el trabajo de Zheng (*et al.*, 2015) que proponen las diferentes zonas de clasificación del sistema. En la figura 1 se muestra el proceso de reconocimiento de fallas usando SVM.

Figura 1  
Proceso de reconocimiento de fallas usando SVM



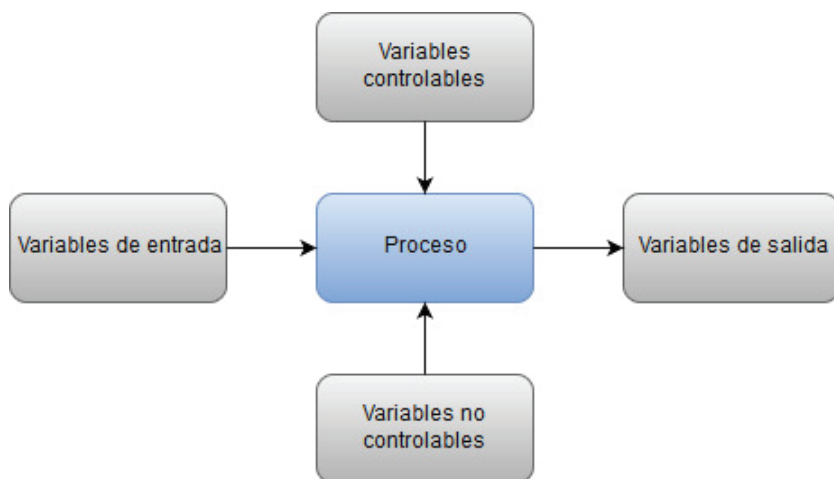
Fuente: Zheng *et al.*, 2015

### *Datos de entrenamiento y de prueba*

La tesis de Arízaga Idrovo y Ordóñez Galarza (2016) referente a la elaboración de una base de datos de fallas, en donde se interviene sobre el sistema de inyección, ignición y alimentación de combustible de un motor Hyundai Accent DOHC 1.5L; fue creada a través del procesamiento estadístico de la señal del sensor de oxígeno de banda corta.

El proceso de adquisición de datos contempla en su estructura las variables de entrada, controlables y no controlables que se muestran en la figura 2. Dichas variables influyen directamente en el proceso y por ende en los datos de salida.

Figura 2  
Variables presentes en el proceso de adquisición de datos



Fuente: los autores

En la creación de la base de datos se interviene en los sistemas relacionados a la presión de la bomba de combustible, distancia entre

electrodos de las bujías y el paso de combustible del inyector. La regulación de la presión se realiza entre los rangos detallados a continuación:

Tabla 2  
Bomba de combustible

Variable de entrada	Condiciones			Unidad
	Bajo	Medio	Alto	
Bomba de combustible	30	40	50	PSI

Fuente: los autores

La separación entre el electrodo central y el electrodo de masa de la bujía, se la realiza a los valores de espesor detallados en la siguiente tabla:

Tabla 3  
Separación del electrodo

Variable de entrada	Condiciones			Unidad
	Bajo	Medio	Alto	
Apertura	0,7	1	1,3	mm

Fuente: los autores

Al intervenir en el pre-filtro se puede regular el paso de combustible al inyector, generando obstrucción, con lo que se varía el porcentaje de volumen de inyección de combustible. Los valores se detallan a continuación:

Tabla 4  
Porcentaje del inyector

Variable de entrada	Condiciones			Unidad
	Bajo	Medio	Alto	
Inyector	50	75	100	%

Fuente: los autores

*Variables controlables*

En la tabla 5 se presenta cada uno de los factores que se toman en cuenta para cada muestreo.

Tabla 5  
Variables controlables

Variables Controlables	Niveles			Unidades
	Bajo	Medio	Alto	
Régimen de giro	750	1600	2500	rpm
Temperatura del motor (ECT)	96	96	96	°C
Presión absoluta del colector de admisión (MAP)	30	20	22	KPa

Fuente: los autores

*Variables no controlables*

Las variables no controlables son todas aquellas que no se pueden intervenir y alteran las pruebas tomadas en cada muestreo; se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 6  
Variables no controlables

Variables no controlables	Valor	Unidad
Temperatura del aire	19 a 25	°C
Carga externa del motor	0	%
Humedad relativa	60 a 90	%

Fuente: los autores

La tabla 7 muestra un porcentaje de los datos a utilizar para el análisis, se detallan en ella las variaciones de los elementos intervenidos en el proceso de adquisición de datos, y los valores obtenidos de los gases de combustión en el proceso de escape y presión absoluta en el colector de admisión.

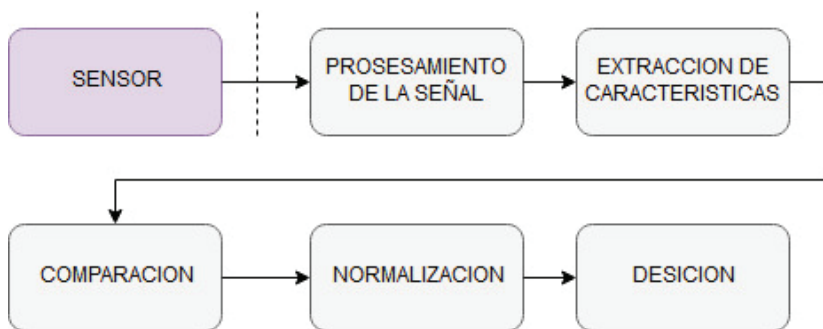
Tabla 7  
Datos obtenidos con la intervención  
en los sistemas de inyección, ignición y alimentación

Inyector	Bujía	P. Bomba	MAP	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
75	1	40	24,1666667	0,0000000	55,3333333	16,3666667	0,2266667
50	1,3	40	24,3333333	0,0500000	33,6666667	17,2666667	0,1133333
100	1	30	24,3333333	0,0033333	23,0000000	17,8666667	0,1300000
75	0,7	50	24,3333333	0,0000000	39,3333333	16,6666667	0,1600000
50	1	30	24,3333333	0,0600000	50,3333333	17,3333333	0,0966667
100	1	50	24,1666667	0,0100000	27,3333333	16,8666667	0,1700000
100	1,3	40	24,3333333	0,0166667	35,0000000	17,1333333	0,1033333
100	0,7	40	24,0000000	0,0233333	42,6666667	16,8333333	0,1566667
75	0,7	30	24,3333333	0,0200000	51,0000000	16,5666667	0,2700000
75	1,3	50	24,1666667	0,0000000	61,0000000	16,4666667	0,3200000
75	1	40	24,0000000	0,0100000	41,0000000	16,9333333	0,1533333
50	0,7	40	24,1666667	0,0133333	23,0000000	16,9000000	0,1566667
50	1	50	24,6666667	0,0000000	34,0000000	16,1000000	0,1200000
75	1,3	30	24,1666667	0,0100000	54,6666667	16,9333333	0,2133333
75	1	40	24,1666667	0,0100000	42,0000000	16,7000000	0,2033333
75	0,7	40	24,0763667	0,0083333	45,2222000	16,6791667	0,2184723
75	1	30	24,2430333	0,0137500	51,0138667	16,7416667	0,2084723
75	1	50	24,2847000	-0,0070834	46,6805333	16,3416667	0,2234723
75	1,3	40	24,1180333	0,0133333	52,3055333	16,8875000	0,2201390
50	1,3	30	24,2778000	0,0691667	48,9028000	17,6666667	0,0906943
50	1,3	50	24,5694667	0,0200000	43,2361333	16,3666667	0,2056943
50	1	40	24,3055333	0,0304166	32,5555333	16,9041667	0,0984721
50	0,7	30	24,3194667	0,0475000	41,6528000	17,1416667	0,1923610
50	0,7	50	24,6111333	-0,0043542	17,9861233	16,4083333	0,0906945
100	1	40	24,1388667	0,0129166	29,3055333	16,9291667	0,1168055

Fuente: Arízaga Idrovo y Ordóñez Galarza, 2016

En la figura 3 se observa un diagrama que detalla las fases de las cuales consta el proceso de diagnóstico en línea. La línea entrecortada representa el límite entre el sistema físico (hardware) y el sistema informático (software). En donde, el sensor de oxígeno es el encargado de obtener los datos que representan las entradas del sistema. A continuación, se procesan los datos de manera que se adapten a las necesidades deseadas y como siguiente paso se extraen características que distinguen de mejor manera la condición de funcionamiento del sistema en un momento dado. Dichos parámetros característicos se comparan con los patrones previamente aprendidos y a partir de esta comparación se toma una decisión correspondiente a la avería en la calibración de las bujías, apertura del inyector o una deficiente presión de la bomba.

Figura 3  
Esquema del sistema de diagnóstico en línea autónomo



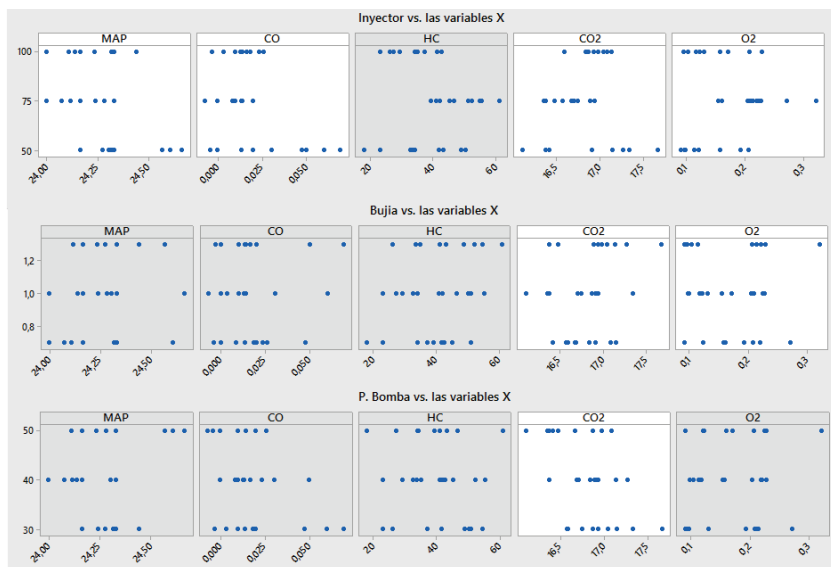
Fuente: los autores

### *Pre-tratamiento y extracción de características de los datos*

La etapa de pre-tratamiento está asociada con la obtención del conjunto de descriptores de los datos de fallas (Galar Pascual *et al.*, 2013). La presión de la bomba de combustible, la distancia entre electrodos de las bujías y el paso de combustible del inyec-

tor, reflejan la variación de los siguientes valores: presión absoluta en el colector de admisión, monóxido de carbono, hidrocarburos no combustionados, dióxido de carbono y oxígeno. Estos últimos predicen el comportamiento del sistema en base a las variables de entrada. En la figura 4 se muestran los datos de salida que están en el modelo y sirven para predecir su comportamiento. La figura 4 muestra los valores de: Inyector, Bujía y P. Bomba enfrentados a las variables X (MAP, CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>), en tales gráficas (superior, media e inferior) se diferencia las variables que no predicen en gran parte el modelo (color gris), por otro lado, las gráficas de color blanco son las variables que más información aportan.

Figura 4  
Variables presentes en el modelo (blanco)  
y variables que no están presentes en el modelo (gris)



Fuente: los autores



### Clases

Las clases a las que pertenece un grupo de datos definen el tamaño del espacio de características de las máquinas de soporte vectorial. Para este caso, en base al pre-tratamiento, se optó por seleccionar la variación del paso de combustible del inyector, en sus diferentes valores (alto, medio y bajo) como clases, y como predictores las variables MAP, CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

## Análisis de resultados

### Entrenamiento de SVM

Como se explicó anteriormente, las herramientas de aprendizaje y clasificación utilizan funciones Kernel para separar los datos una vez que se transportan a un espacio de mayor dimensión, y los resuelven como un problema de tipo lineal. En la tabla 8 se muestran dichas funciones Kernel a las cuales corresponde un porcentaje de precisión en la solución clasificatoria. Se observa que la máquina de soporte vectorial basada en una función lineal tiene una asertividad del 100%.

Tabla 8  
Porcentajes de precisión de SVM basadas en Kernel Machines

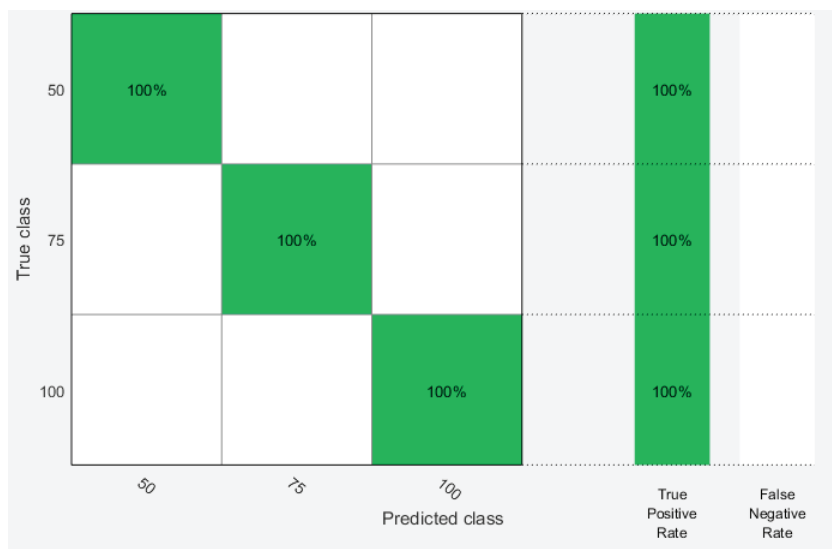
SVM basadas en Kernel Machines	Precisión
SVM lineal	100%
SVM cuadrática	33,33%
SVM cúbica	16,70%
SVM gaussiano fino	50,00%
SVM gaussiano medio	66,70%
SVM gaussiano ordinario	83,30%

Fuente: los autores

La figura 5 muestra en la diagonal principal el número de datos correctamente clasificados. No existen elementos ubicados fuera de la

diagonal principal, es decir, no existen errores de asignación (marginales). Para dicho proceso de entrenamiento se utilizó el 75% de todos los datos presentes en la tabla 6 con respecto a la variación del paso de combustible del inyector (el 25% restante para validación del modelo). Las tres clases de datos se separan en: 100, 75 y 50, atendiendo al 100%, 75% y 50% del paso de combustible al inyector, respectivamente.

Figura 5  
Matriz de confusión para las tres clases de datos  
del paso de combustible al inyector

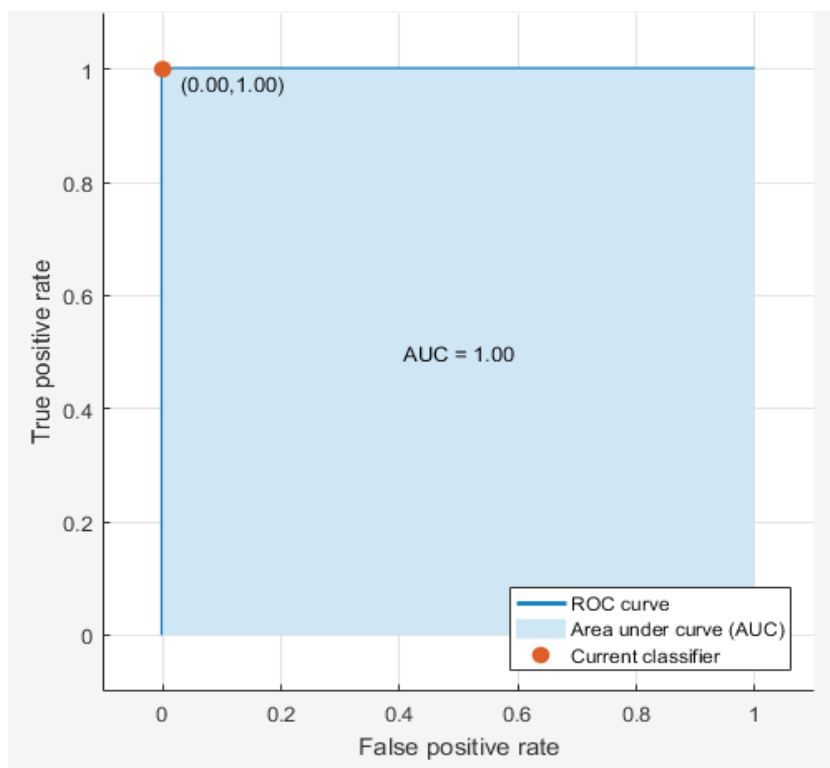


Fuente: los autores

La curva de características operativas del receptor, también llamada curva ROC por su acrónimo en inglés, muestra la relación de las tasas de verdaderos positivos (sensibilidad) y falsos positivos (especificidad), es decir, la probabilidad de clasificación correcta de cada dato en cada clase. Como se observa en la figura 6, la clasificación actual tiene las coordenadas (0,1), lo cual demuestra que los verdaderos positivos o correctamente clasificados se encuentran en el punto más alto (la uni-

dad), y los falsos positivos o incorrectamente clasificados se encuentran en el punto más bajo (cero) de la curva ROC. Con esto, el área bajo la curva (AUC) es igual a la unidad y demuestra la correcta clasificación de los datos.

Figura 6  
Curva de característica operativa del receptor

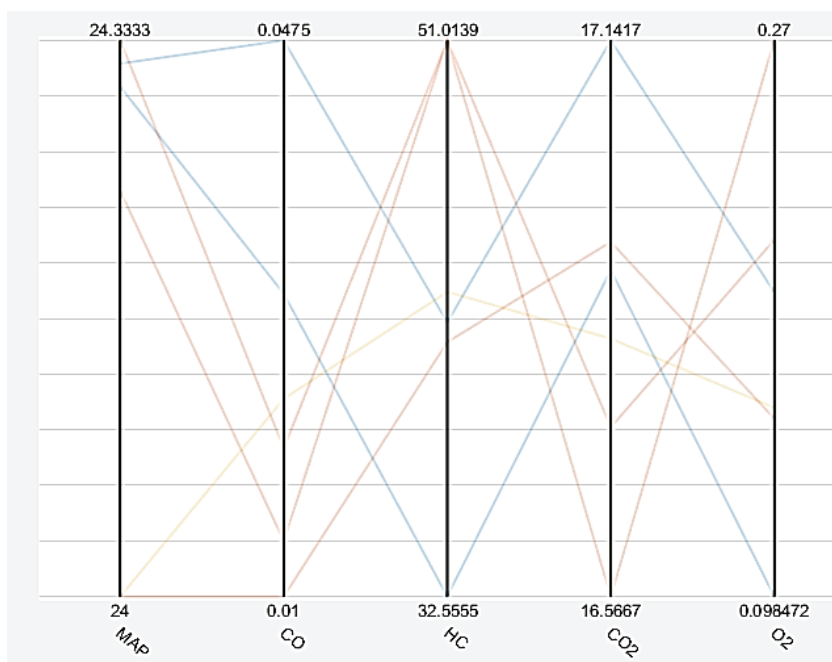


Fuente: los autores

Los gráficos de coordenadas paralelas son ideales para la comparación de muchas variables juntas valorando las relaciones entre ellas, dichas variables se encuentran en los ejes dispuestos en paralelo uno a

uno como se observa en la figura 7. Los valores de MAP, CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> corresponden a los ejes paralelos y las interacciones de las líneas muestran la relación entre datos del modelo de entrenamiento.

Figura 7  
Grafica de coordenadas paralelas  
de las variables: MAP, CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>



Fuente: los autores

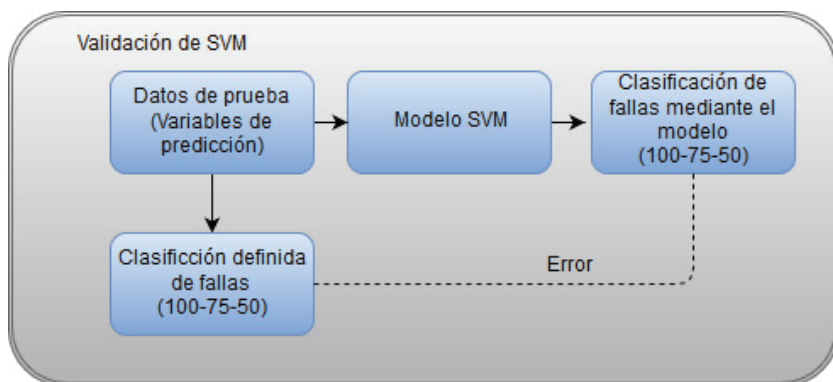
### Modelo SVM para el reconocimiento de fallas

En el entrenamiento de la SVM se obtuvo que la función Kernel tipo lineal otorga una precisión del 100% en la clasificación de datos, a diferencia de las otras funciones cuya precisión es inferior al 85%. Este porcentaje de clasificación debe ser validado con nuevos datos, el 75%

del conjunto de datos fue utilizado en el proceso de entrenamiento y el 25% destinado para la validación del modelo.

Los datos de prueba para validar el modelo SVM, al igual que el conjunto de datos para el entrenamiento, constan de la variable de respuesta (inyector) y las variables de predicción (MAP, CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>). El modelo SVM es alimentado con las variables de predicción y otorga la clasificación de fallas (100, 75 y 50) para ser comparadas con la clasificación definida y obtener el error porcentual de clasificación, esto se muestra en la figura a continuación:

Figura 8  
Proceso de validación de la máquina de soporte vectorial



Fuente: los autores

La tabla 9 muestra los datos utilizados en la validación, en la fila nueve se observa que existe un error de asignación, entonces el modelo SVM agrupa una falla en la clase 100 y la clasificación definida muestra que realmente pertenece a la clase 50.

Tabla 9  
Comparación de la clasificación mediante  
el modelo SVM y la clasificación definida de fallas

Nº	Clasificación mediante el modelo SVM	Clasificación definida de fallas	MAP	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	75	75	24,33333	0,00000	39,33333	16,66667	0,16000
2	50	50	24,33333	0,06000	50,33333	17,33333	0,09667
3	100	100	24,16667	0,01000	27,33333	16,86667	0,17000
4	100	100	24,33333	0,01667	35,00000	17,13333	0,10333
5	100	100	24,00000	0,02333	42,66667	16,83333	0,15667
6	75	75	24,33333	0,02000	51,00000	16,56667	0,27000
7	75	75	24,16667	0,00000	61,00000	16,46667	0,32000
8	75	75	24,00000	0,01000	41,00000	16,93333	0,15333
9	100	50	24,16667	0,01333	23,00000	16,90000	0,15667
10	50	50	24,66667	0,00000	34,00000	16,10000	0,12000
11	75	75	24,16667	0,01000	54,66667	16,93333	0,21333
12	75	75	24,16667	0,01000	42,00000	16,70000	0,20333
13	75	75	24,07637	0,00833	45,22220	16,67917	0,21847
14	75	75	24,24303	0,01375	51,01387	16,74167	0,20847

Nº	Clasificación mediante el modelo SVM	Clasificación definida de fallas	MAP	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
15	75	75	24,28470	-0,00708	46,68053	16,34167	0,22347
16	75	75	24,11803	0,01333	52,30553	16,88750	0,22014
17	75	75	24,16667	0,00000	55,33333	16,36667	0,22667
18	50	50	24,33333	0,05000	33,66667	17,26667	0,11333
19	100	100	24,33333	0,00333	23,00000	16,86667	0,13000
20	50	50	24,27780	0,06917	48,90280	17,66667	0,09069
21	50	50	24,56947	0,02000	43,23613	16,36667	0,20569
22	50	50	24,30553	0,03042	32,55553	16,90417	0,09847
23	50	50	24,31947	0,04750	41,65280	17,14167	0,19236
24	50	50	24,61113	-0,00435	17,98612	16,40833	0,09069
25	100	100	24,13887	0,01292	29,30553	16,92917	0,11681
26	100	100	24,31947	0,01833	37,23613	16,58333	0,20736
27	100	100	24,11113	0,02583	34,23613	17,08333	0,12236
28	100	100	24,44447	-0,00333	26,15280	17,04167	0,09569
29	100	100	24,23613	0,01417	41,15280	16,97500	0,22736

Fuente: los autores

Por tanto, esta asignación corresponde a un error relativo de clasificación que toma en cuenta la diferencia entre el número real de fallas correctamente clasificadas o valor exacto (veinte y nueve) y el número aproximado de fallas correctamente clasificadas o valor aproximado (veinte y ocho), sobre el número real de fallas correctamente clasificadas:

$$ER\% = \frac{\text{Valor exacto} - \text{Valor aproximado}}{\text{Valor exacto}} \cdot 100 = \frac{29 - 28}{29} \cdot 100 = 3.448\%$$

Lo emplea de manera similar Wu (*et al.*, 2016) en su trabajo como recurso para medir la exactitud y la fiabilidad de la predicción de un modelo SVM sobre fallas de motores de combustión interna.

## Conclusiones

El proceso de aprendizaje de las SVM es el punto fundamental, ya que un buen porcentaje de clasificación muestra que el modelo funciona y es aplicable con nuevos datos. Si el modelo otorga un porcentaje de clasificación deficiente se debe a que no existe relación entre variables de predicción y la variable de respuesta.

Un análisis mediante una matriz de confusión y un curva ROC puede mostrar la cantidad de datos marginales existentes y la sensibilidad en la clasificación de estos, lo que las convierte en una herramienta versátil para el análisis de la máquina de soporte vectorial luego de su entrenamiento.

Mientras los datos tengan relación y aporten información al sistema la SVM tiene un margen de error mínimo en su clasificación, las gráficas de coordenadas paralelas muestran cada variable de predicción del conjunto de datos y sus correspondientes puntos comunes.

El modelo SVM desarrollado puede predecir la avería en un motor de combustión interna con un porcentaje de confiabilidad correspondiente a un 97%, lo cual indica que el algoritmo puede utilizarse de



manera segura en el diagnóstico de los diferentes sistemas del vehículo debido a su alto porcentaje de confiabilidad.

Al realizar la comparación del modelo utilizando datos nuevos de prueba, se observa que el algoritmo falló una sola vez al clasificar una falla, en donde el inyector se abrió al 100% y el algoritmo lo clasificó como una apertura del 50%, pero se puede decir que el modelo funciona correctamente ya que las otras 28 fallas se clasificaron correctamente.

Las SVM son unas herramientas que pueden separar datos en más de dos clases, lo que las hace muy útiles para resolver problemas de clasificación multi-clase con poca cantidad de muestras. Siendo por tanto de gran utilidad y ampliamente aplicables al diagnóstico de fallas en motores de combustión interna.

## Referencias bibliográficas

- Achmad, W. y Bo-Sunk, Y. (2014). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Elsevier*, 2560-2574.
- Arízaga Idrovo, H. A. y Ordóñez Galarza, D. M. (2016). *Elaboración de una base de datos de un motor de encendido provocado Hyundai Accent DOHC 1.5L a través del procesamiento estadístico de la señal del sensor de oxígeno de banda corta*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.
- Galar Pascual, D., Berges Muro, L., Lambán Castillo, P., Huertas Talón, J. y Tormos Martínez, B. (2013). Cálculo de la vida útil remanente mediante trayectorias móviles entre hiperplanos de máquinas de soporte vectorial. *Interciencia*, 556-562.
- Gómez García, M. J., Castejón Sisamón, C. y García Prada, J. C. (2016). *Detección y localización automática de defectos en rodamientos basada en WPT y SVM*. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, pp. 345-352.
- Jabbour, G., Márquez, R., Ruiz, L. y Maldonado, L. (2012). Reconocimiento de firmas off-line mediante máquinas de vectores de soporte. *Revista de Ciencia e Ingeniería*, 31, 43-52.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Moosavian, A., Yusaf, T., Kettner, R., Kettner, M. y Azmi, W. H. (2016). SVM and ANFIS for prediction of performance

- and exhaust emissions of a SI engine with gasoline-ethanol blended fuels. *Elsevier*, 186-203.
- Ortiz, M. A. (2014). *Diseño de un algoritmo de diagnóstico de fallas monofásicas en máquinas sincrónicas de polos salientes usando la máquina de soporte vectorial*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Sánchez Anzola, N. (2015). Máquinas de soporte vectorial y redes neuronales artificiales en la predicción del movimiento USD/COP spot intradiario. *Odeon*, 113-172.
- Wu, X., Zhu, Z., Fan, S. y Su, X. (2016). Failure and reliability prediction of engine systems using iterated nonlinear filters based state-space least square support vector machine method. *Elsevier Optik*, 127, 1491-1496.
- Zheng, J.-Y., Yang, Z.-X., Wu, G.-G., Li, X.-M. y Wang, J. (2015). *FTA-SVM-based Fault Recognition for Vehicle Engine*. 12th International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 180-184.



# Detección de fallas incipientes a través del análisis de vibraciones mediante tiempos cortos en un motor Sonata EF 2.0

---

Néstor D. Rivera Campoverde<sup>1</sup>

Steven R. Ronquillo Ronquillo<sup>2</sup>

Pedro E. Cabrera Bravo<sup>3</sup>

Andrea K. Bermeo Naula<sup>4</sup>

## Resumen

El presente proyecto trata sobre la detección de fallas incipientes previamente provocadas a un motor de combustión interna, a través de las características de las señales de vibraciones que se presentan en el motor. Los datos para el análisis son obtenidos mediante el acelerómetro, y en concordancia con los datos de la pinza inductiva se determinan el inicio y fin de un ciclo de trabajo del motor. La señal característica obtenida representa las oscilaciones vibrantes en condiciones estables e inducidas. El método a usar es de análisis de varianza ANOVA. En el proyecto se analizan las diferencias existentes entre las señales de fallas incipientes con la señal en condiciones estándar, y las diferencias entre las señales con las diferentes fallas.

## Palabras clave

Análisis de tiempos cortos, espectros de vibración, fallas incipientes.

## Abstract

*This project describes the detection of incipient faults caused to an internal combustion engine. The data is obtained by means of an accelerometer, and with the inductive clamp an engine working cycle*

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (steven.ronquillo@asur.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (pcabrerab@est.ups.edu.ec).
  - 4 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (abermeeon@ups.edu.ec).

*is determined. The method to be used is Analysis of Variance ANOVA, it makes differences between signals with faults with the signal in standard conditions, and the differences between signals with faults.*

**Keywords**

*Short-Time analysis, vibration spectra, incipient failures.*

## Introducción

El presente documento aborda un estudio donde se pueden detectar fallas incipientes, contribuyendo de esta manera a la mejora continua del diagnóstico automotriz referente al motor. La adquisición de señales vibratorias se evalúa mediante la aplicación de software matemático y estadístico como son la función ventana junto con la transformada rápida de Fourier (FFT) y el análisis de varianza ANOVA, respectivamente.

En el campo automotriz, el constante desarrollo tecnológico e industrial suscitado a nivel mundial, sigue descubriendo como uno de sus objetivos la reducción y control de contaminantes expuestos por motores de combustión, el cual cuenta con grandes tecnologías enfocados a cumplir los mismos. Los avances suscitados tienen como progreso la evaluación y análisis de señales vibratorias, facilitando la identificación de sucesos ocurridos en el motor durante el proceso de combustión para el diagnóstico apropiado.

## Metodología

### *Diseño experimental*

La metodología aplicada es el diseño experimental mediante superficie de respuesta Box-Benhken, el cual consta de cinco variables con tres niveles cada una, las mismas que se pueden manipular durante el ensayo al momento de la toma de datos, para dar un efecto a la variable de respuesta que se desea analizar. Para el diseño de experimentos se consideraron cinco factores, cada uno con tres niveles (alto, medio y bajo). En la tabla 1 se puede observar los factores con sus niveles respectivos.

Tabla 1  
Factores y niveles del diseño experimental

Factores	Unidad	Niveles		
		Bajo	Medio	Alto
Presión de combustible	Mpa	0,125	0,3	0,475
Capacidad de filtro de aire	%	25	62,5	100
Obstrucción del catalizador	cm <sup>2</sup>	7,54	14,8	22,06
Calibración de bujías	mm	0,8	1	1,2
Régimen de giro	rpm	760	1630	2500

Fuente: los autores

## Obtención de señales

### Cámara semi-anecoica

Para obtener los datos de manera confiable y sin presencia de ruidos extraños o perturbaciones externas, los ensayos se realizan en el interior de una cámara semi-anecoica, la cual se encuentra en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca:

Figura 1  
Cámara semi-anecoica y motor de pruebas



Fuente: los autores

### *Equipo de monitoreo*

El equipo ADASH A3716 que se muestra en la figura 2, se utiliza como registrador de datos de los ensayos realizados. El software está diseñado para controlar, coleccionar y archivar datos. Permite una fácil configuración de las ediciones requeridas, además permite el despliegue en línea de los valores actuales en los esquemas predefinidos (Vibraciones, 2017).

Figura 2  
Equipo de monitoreo ADASH



Fuente: los autores

Además, este equipo permite transformar las diferentes señales registradas en un solo archivo de audio de extensión .wav, para poder analizar y manipular por medio del Software Matlab.

## *Canales analizados*

### *Tacómetro*

El tacómetro es tipo óptico, para su funcionamiento debe ser colocada una cinta reflectiva en el punto móvil, el mismo que es la polea del cigüeñal, el tacómetro emite un haz de luz para poder obtener una medida precisa del régimen de giro del motor. En la figura 3 se observa la ubicación correcta del tacómetro.

Figura 3  
Ubicación del tacómetro



Fuente: los autores

### *Pinza inductiva*

Para poder corroborar los datos obtenidos con el acelerómetro se requiere conocer el momento en el que se da el salto de chispa en el primer cilindro. Para obtener estos datos se utilizó una pinza inductiva colocada en el cable de bujía del primer cilindro, como se muestra a continuación:



Figura 4  
Pinza Inductiva conectada al cilindro 1



Fuente: los autores

### *Acelerómetro*

Para la ubicación adecuada del acelerómetro se toma como referencia la Norma ISO 10816-6:1995: “Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts”, que indica que se utiliza para máquinas alternas con potencias superiores a 100 kW (Norma 10816-6, 2017). Según la norma, el acelerómetro debe ser colocado en la parte lateral, perpendicular al eje longitudinal del motor, como se muestra en la figura:

Figura 5  
Ubicación del acelerómetro en la parte lateral del motor



Fuente: los autores

### *Nomenclatura de datos*

En la figura 6 se puede observar la codificación denominada a cada uno de los datos, para de esta manera diferenciar cada una de las muestras tomadas.

### *Matriz de diseño experimental*

Con ayuda de Minitab, se crea un diseño experimental donde se indica el número de factores y aleatorización. La aleatorización es una técnica utilizada para equilibrar el efecto de condiciones externas o no controlables que pueden influir en los resultados de un experimento. En la tabla 2 se indica un fragmento del orden que se debe seguir para la adquisición de datos.

Figura 6  
Nomenclaturas de los datos obtenidos

1	Modelo del motor
2	Cilindrada
3	Tipo de combustible
4	Presión de combustible
5	Calibración de bujías
6	Obstrucción de catalizador
7	Capacidad de flujo del filtro de aire.
8	Régimen de giro
9	Número de repeticiones de cada muestra (1-2-3)

SONATA 2.0.GAS.0,3-1-7,54-25-1630\_1  
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Fuente: los autores

Tabla 2  
Fragmento de matriz de diseño experimental

#	Presión de Combustible	Bujías	Obstrucción catalizador	Filtro de aire	rpm	Nombre de la prueba
1	0,3	1	7,54	25	1 630	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-25-1630_1
2	0,125	1	14,8	14,8	2 500	SONATA 2.0 GAS 0,125-1-14,8-62,5-2500_1
3	0,3	0,8	22,06	22,06	1 630	SONATA 2.0 GAS 0,3-0,8-22,06-62,5-1630
4	0,475	1	14,8	14,8	2 500	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-25-1630_1
5	0,475	1	14,8	14,8	1 630	SONATA 2.0 GAS 0,475-1-14,8-62,5-2500_1
6	0,3	0,8	14,8	14,8	2 500	SONATA 2.0 GAS 0,3-0,8-14,8-62,5-2500_1
7	0,125	1	14,8	14,8	1 630	SONATA 2.0 GAS 0,125-1-14,8-100-1630_1
8	0,3	1	22,06	22,06	2 500	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-62,5-2500_1
9	0,3	1	7,54	7,54	1 630	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-100-1630_1

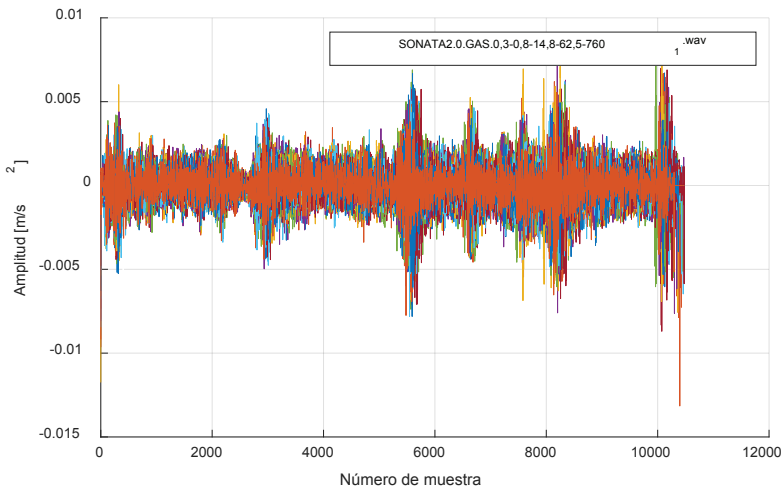
Fuente: los autores

## Análisis de vibraciones

El objetivo de analizar las señales de los datos tomados, es extraer la mayor cantidad de valores característicos, para así permitir diferenciar cada una de las muestras tomadas y establecer las características necesarias de una señal, la misma que corresponde a cierta falla generada en el motor.

En la figura 7 se muestra la señal temporal del acelerómetro captador de vibraciones para la prueba SONATA2.0.GAS.0,3-0,8-14,8-62,5-760\_1, tomada en un tiempo de 5 segundos. La señal indicada es la original, obtenida desde el equipo de medición Adash y mostrada en el software de análisis matemático Matlab, la frecuencia de muestreo es de  $F_s=65536$  Hz la misma que es característica de la capacidad del sensor. Con esta frecuencia de muestreo se pretende captar una cantidad adecuada de muestras para las fallas insipientes que se establecieron.

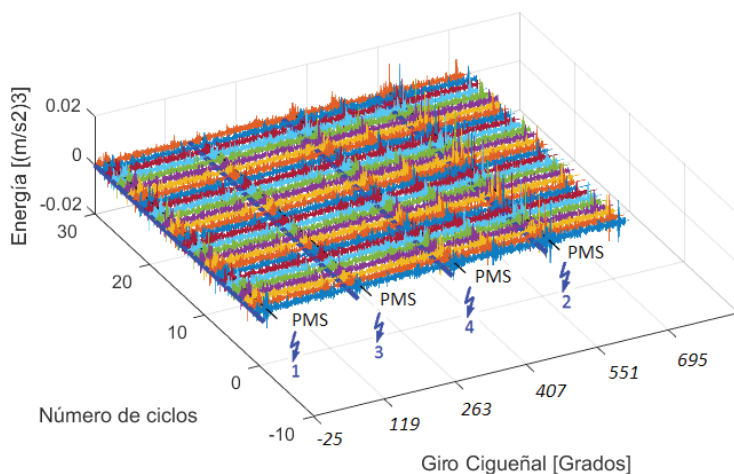
Figura 7  
Señal temporal del acelerómetro



Fuente: los autores

En la figura 8 se muestra la señal representada en 3D, donde la línea azul representa el salto de chispa con un adelanto de  $25^\circ$  y la línea negra representa el punto muerto superior (PMS) de cada cilindro para la muestra tomada en condiciones estándar divididas por ciclos de trabajo.

Figura 8  
Señal de la muestra en condición estándar representadas en 3D

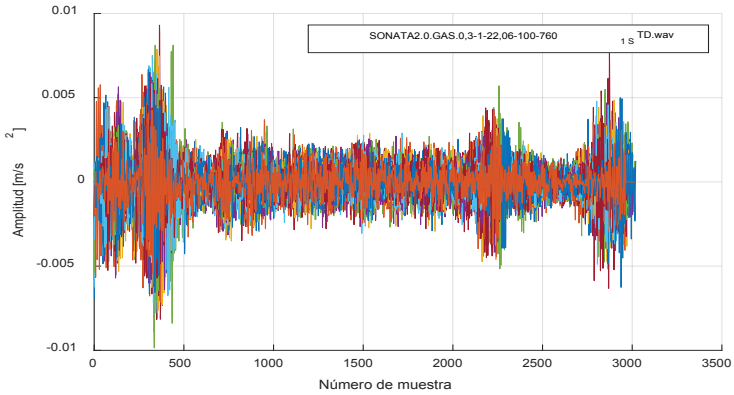


Fuente: los autores

La figura 9 representa la ventana rectangular, ya que la misma posee un valor de 1 para todo el intervalo de la ventana y 0 para cualquier otro valor. Para el motor en estudio dicho intervalo se da desde  $-25^\circ$ , que es el adelanto de la chispa, hasta los  $180^\circ$ , que se produce el trabajo del motor.

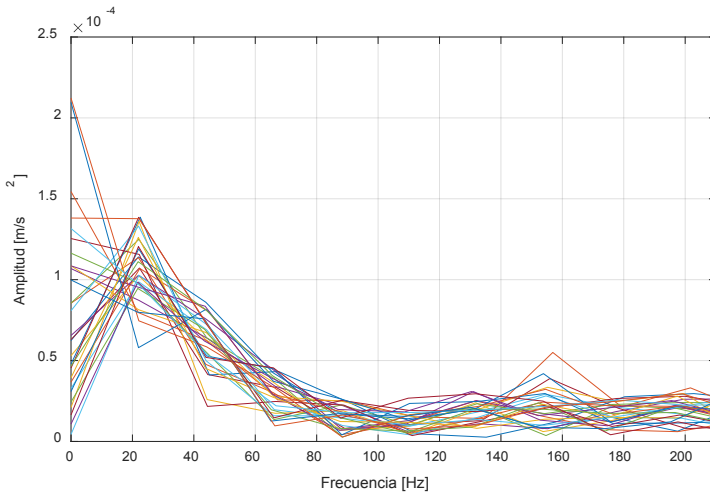
En la figura 10 se muestra la FFT de la función ventana, la misma que representa cada una de las señales de los ciclos de trabajo en el momento en que se da el salto de chispa y se produce la combustión.

Figura 9  
Ventaneo de la señal en condiciones estándares



Fuente: los autores

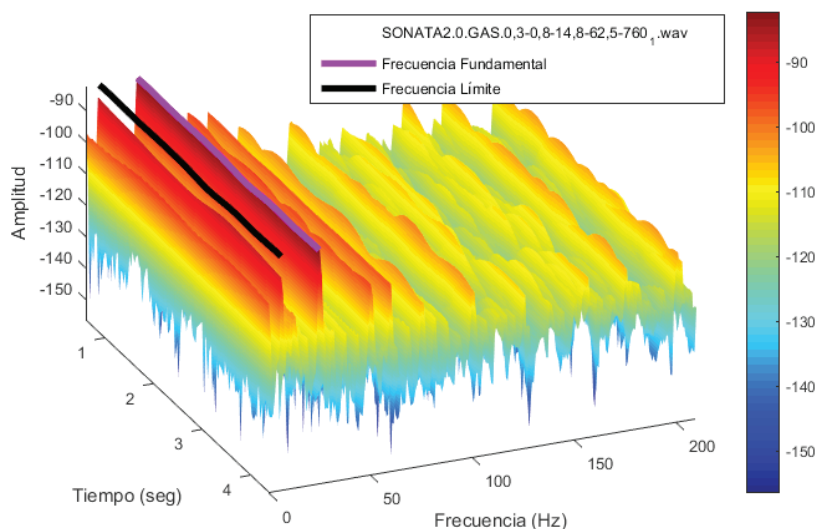
Figura 10  
Transformada de Fourier de la función ventana



Fuente: los autores

En la figura 11 muestra el espectrograma de la señal del acelerómetro para la prueba SONATA2.0.GAS.0,3-0,8-14,8-62,5-760\_1, donde se puede identificar la frecuencia fundamental (línea violeta) y frecuencia máxima (línea negra), y las frecuencias principales se mantienen con un rango muy pequeño de variación durante toda la muestra, estas frecuencias son las mismas que se determinaron con la FFT.

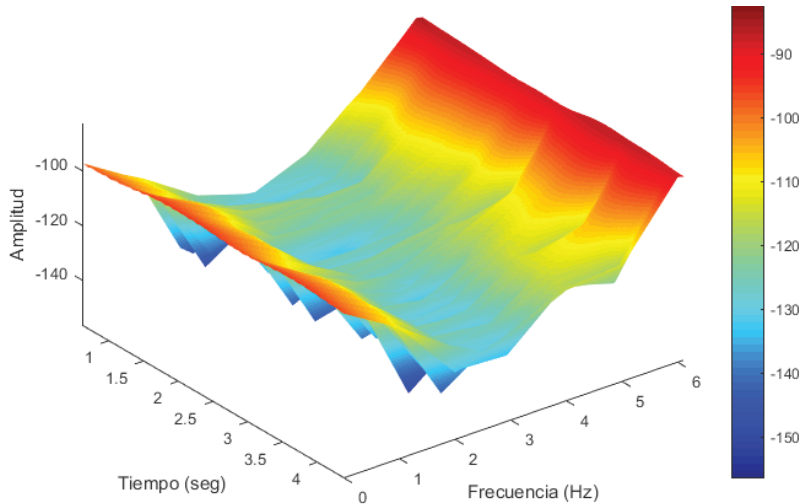
Figura 11  
Espectrograma de la señal con una vista en 3D



Fuente: los autores

Si existieran valores inferiores a la frecuencia límite, el proceso de división por ciclos de trabajo sería erróneo. En la figura 12 se muestra claramente la inexistencia de frecuencias inferiores a los 6 Hz.

Figura 12  
Inexistencia de frecuencias inferiores a las 6Hz



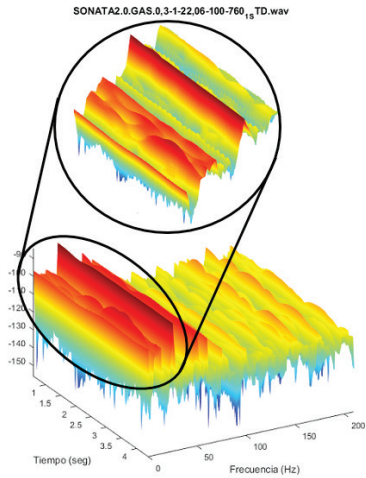
Fuente: los autores

Con este análisis se puede corroborar la existencia de frecuencias aproximadamente estacionarias durante la toma de datos, las mismas que aportan información que permite comprobar la confiabilidad del análisis de Fourier, ya que en este se encuentran las mismas frecuencias determinadas con la FFT y se mantienen a lo largo del tiempo de la prueba.

En la figura 13 se puede observar la prueba SONATA 2.0.gas.0,3-1-22,6-100-760\_1\_STD que se encuentra en condiciones estándares de funcionamiento y en la figura 14 la prueba SONATA2.0.G AS.0,3-0,8-14,8-62,5-760\_1 la cual consiste en una falla de las generadas al motor. En la figura se puede diferenciar entre el acercamiento que se da a cada una de ellas que la frecuencia y la amplitud son diferentes con respecto al tiempo.

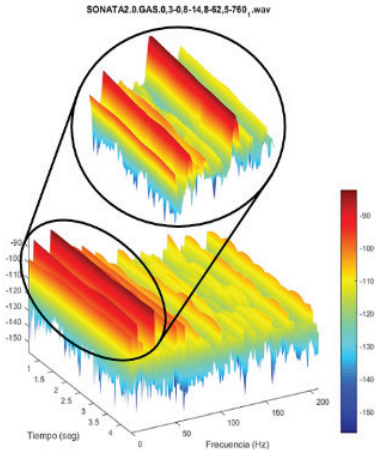


Figura 13  
Espectrograma de la muestra estándar



Fuente: los autores

Figura 14  
Espectrograma de la muestra con una falla generada



Fuente: los autores

## Extracción y análisis de los valores característicos de las señales analizadas

Para poder realizar una comparación entre las señales en condiciones estándares de funcionamiento con las señales con las diferentes fallas, es necesario extraer las características de dichas señales, los valores característicos serán analizadas en el software de cálculo Matlab. A las señales de falla y las señales estándares de funcionamiento se les extraen características importantes, entre ellas: Media, Varianza, Desviación STD, Mediana, Máximo, Mínimo, Potencia, Energía, Factor de Kurtosis, Asimetría, Valor RMS, Factor de cresta.

El análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores (Minitab, 2017).

Para determinar el análisis se compara las señales OK y las fallas incipientes provocadas al motor, también se realiza la comparación entre las señales con las diferentes fallas, llegando a establecer la hipótesis nula o a su vez la hipótesis alternativa. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Minitab, 2017).

Para el análisis de los valores característicos de las señales obtenidas se asigna una nomenclatura para las fallas incipientes y para las muestras en condiciones estándares, la misma que se muestra en la tabla 3.

### *Análisis del valor característico: Media*

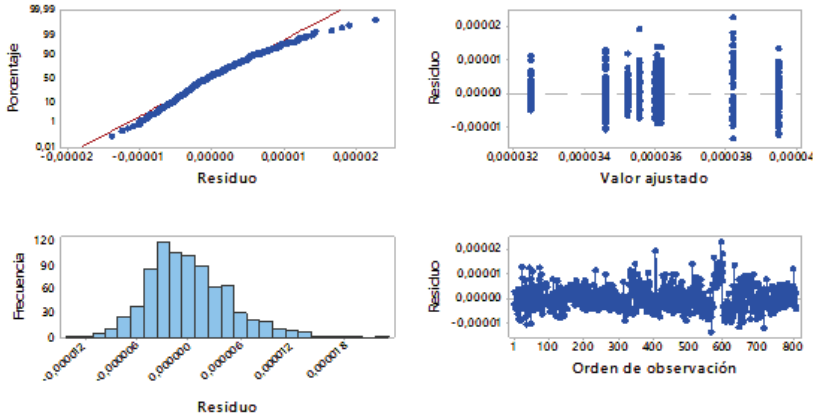
Las gráficas de residuos proporcionadas por el software Minitab® son utilizadas para analizar el ajuste en la regresión y ANOVA determinando si se cumplen los supuestos de cuadrados mínimos ordinarios. La gráfica de residuos mostrado en la figura 15 representa el supuesto de que los residuos están normalmente distribuidos, también muestra una varianza constante, a su vez el supuesto de que los residuos no están correlacionados entre sí y que no existen valores atípicos.

Tabla 3  
Nomenclatura asignada a cada una de las señales

Nomenclatura de la señal	Corresponde a
OK	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-100-760_1_STD
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-100-760_2_STD
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-100-760_3_STD
A	SONATA 2.0 GAS 0,3-0,8-14,8-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-0,8-14,8-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-0,8-14,8-62,5-760_3
B	SONATA 2.0 GAS 0,3-1,2-14,8-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1,2-14,8-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1,2-14,8-62,5-760_3
C	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-7,54-62,5-760_3
D	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-25-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-25-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-25-760_3
E	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-100-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-100-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-14,8-100-760_3
F	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,3-1-22,06-62,5-760_3
G	SONATA 2.0 GAS 0,1251-14,8-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,1251-14,8-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,1251-14,8-62,5-760_3
H	SONATA 2.0 GAS 0,475-1-14,8-62,5-760_1
	SONATA 2.0 GAS 0,475-1-14,8-62,5-760_2
	SONATA 2.0 GAS 0,475-1-14,8-62,5-760_3

Fuente: los autores

Figura 15  
Gráfica de residuos para el valor característico de la Media



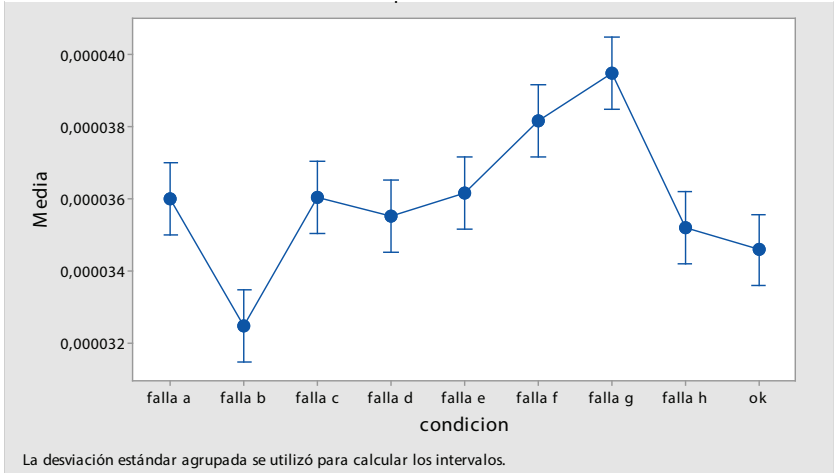
Fuente: los autores

El gráfico de intervalos de la figura 16 muestra el resultado en la comparación del valor característico Media, entre las señales de fallas y OK. Las señales que no se superponen sugieren que son diferentes. Entre ellas, las señales que más inferencia significativa denotan en esta característica son b, f y g, mostrando claramente que no se superponen con las otras señales comparadas, haciendo énfasis en la hipótesis alternativa.

El diagrama de Tukey compara las medias para cada par de niveles de factor utilizado. Los rangos que no incluyan 0 marcan una diferencia estadísticamente significativa. Si los intervalos contienen 0 la diferencia no es estadísticamente significativa.

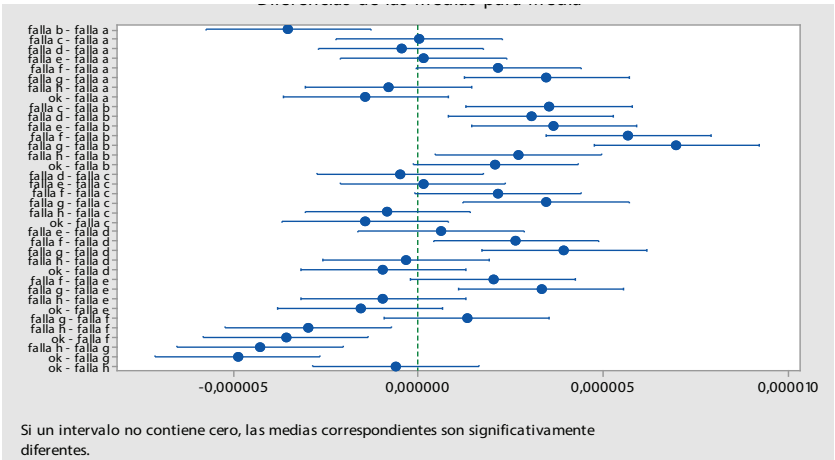
En la figura 17 los pares de señales de fallas que no presentan una inferencia significativa en el valor característico Media son c-a, d-a, e-a, g-a, h-a, ok-a, d-c, e-c, h-c, g-f, y OK-h; aquellas cruzan la línea verde que hace relación a cero.

Figura 16  
Gráfica de intervalos de la Media con respecto a la Condición



Fuente: los autores

Figura 17  
Gráfica de Tukey de la Media con respecto a la Condición

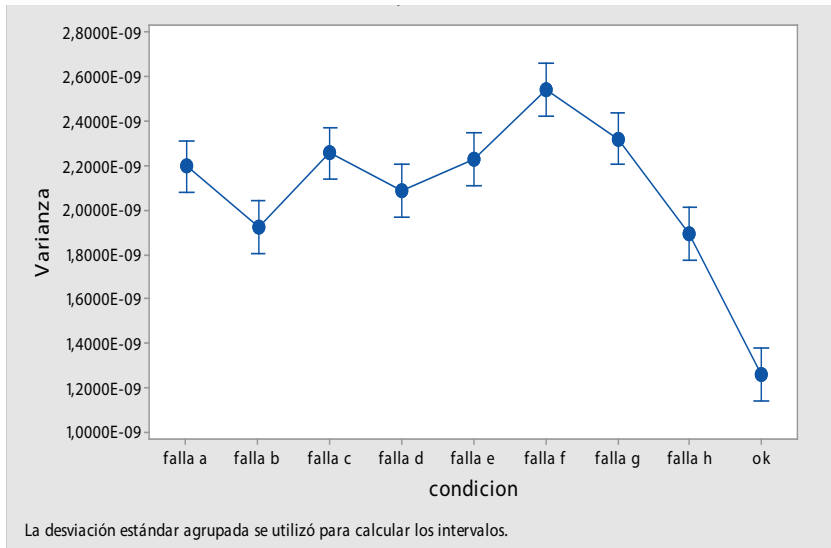


Fuente: los autores

### *Análisis del valor característico: Varianza*

La figura 18 muestra la gráfica de intervalos para el valor característico Varianza, en donde la señal OK representa una mayor inferencia debido a que no se interpone con el resto de señales, siendo esta la más considerable en el análisis, por tal motivo se aprueba la hipótesis alternativa.

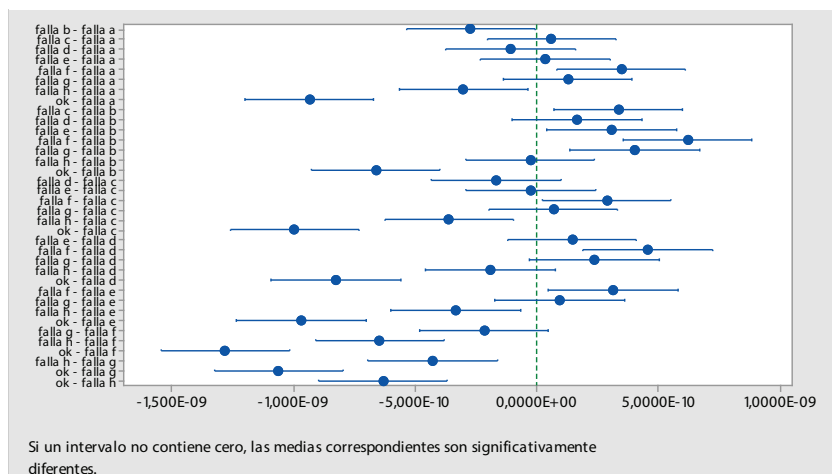
**Figura 18**  
Gráfica de intervalos de la Varianza con respecto a la Condición



Fuente: los autores

La figura 19 muestra en el análisis para el valor característico Varianza, las señales que son estadísticamente significativas entre ellas OK-a, OK-b, OK-c, OK-d, OK-e, OK-f, OK-g. Existiendo una minoría en los pares de señales comparados que atraviesan por cero.

Figura 19  
Gráfica de Tukey de la Varianza con respecto de la Condición



Fuente: los autores

## Comprobación de los resultados obtenidos

Se emplea el análisis ANOVA de los valores característicos mediante el valor “p value”, el valor “p value” obtenido en el análisis ANOVA es utilizado para determinar si los resultados son estadísticamente significativos. El valor p oscila entre 0 y 1. Para un nivel de significancia, suele utilizarse un valor de 0,05, entonces, si el valor p es menor que o igual a 0,05, el valor tiende a ser no significativo (Minitab, 2017).

Se realiza una comparación de los valores característicos entre las señales de las fallas incipientes como también la comparación de la señal ok entre cada falla incipiente, verificando el valor de p, con ello se pretende demostrar la existencia de una diferencia estadísticamente significativa en la comparación individual de la FFT de las señales ventaneadas.

### *Análisis de la señal OK con las señales de fallas incipientes mediante “p value”*

Los parámetros resaltados de la tabla 4 denotan claramente que no existe una inferencia amplia para poder determinar si las señales son significativamente diferentes, debido a que el valor de p se encuentra por encima del estimado. El valor característico mínimo no es aceptable para el análisis, por lo que no es válido para el estudio realizado.

Tabla 4  
Comparación de la señal OK con respecto a las fallas incipientes

Condición	OK-a	OK-b	OK-c	OK-d	OK-e	OK-f	OK-g	OK-h
Media	0,026	0,001	0,045	0,166	0,021	0	0	0,331
Varianza	0	0	0	0	0	0	0	0
Desviación estándar	0	0	0	0	0	0	0	0
Mediana	0,028	0	0,001	0,746	0,188	0,008	0,138	0,188
Máximo	0	0	0	0	0	0	0	0
Mínimo	0,601	0,046	0,018	0,742	0,216	0,437	0,795	0,838
Potencia	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía	0	0	0	0	0	0	0	0
Kurtosis	0	0	0	0	0	0	0	0
Asimetría	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS	0	0	0	0	0	0	0	0
Factor de Cresta	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: los autores

### *Comparación de la falla “a” con las fallas b, c, d, e, f, g, h*

Los valores resaltados de la tabla 3 muestra la comparación de la falla incipiente a con las demás fallas, indicando que entre las fallas a-c, a-d, a-e, y a-h no existe una diferencia estadísticamente significativa, ya que se puede visualizar un valor p elevado. Para todas las fallas en el



valor característico mínimo presenta un valor de p que supera al permitido por lo que no es válido para el estudio presentado el mismo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5  
Comparación de la falla “a” con las fallas b, c, d, e, f, g, h

Condición	a-b	a-c	a-d	a-e	a-f	a-g	a-h
Media	0	0,978	0,436	0,809	0,019	0	0,129
Varianza	0	0,402	0,106	0,609	0,003	0,161	0
Desviación estándar	0	0,415	0,108	0,556	0,008	0,265	0
Mediana	0,003	0,249	0,163	0,461	0,493	0,001	0,424
Máximo	0,001	0,857	0,908	0,08	0,934	0,804	0
Mínimo	0,264	0,166	0,896	0,579	0,887	0,465	0,747
Potencia	0	0,496	0,13	0,586	0,002	0,002	0
Energía	0	0,504	0,135	0,588	0,002	0,001	0
Kurtosis	0	0,614	0,001	0,012	0,001	0	0,452
Asimetría	0	0,546	0,005	0,026	0,002	0	0,323
RMS	0	0,618	0,114	0,607	0,008	0	0
Factor de Cresta	0	0,898	0,029	0,029	0,001	0	0,151

Fuente: los autores

*Comparación de la falla “f” con las fallas g, h*

La comparación de las fallas incipientes f-g de la tabla muestra claramente un valor elevado de p en todos sus valores característicos, indicando que no existe una diferencia estadísticamente significativa para estas fallas como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6  
Comparación de la falla “f” con las fallas g, h

Condición	f-g	f-h
Media	0,196	0,001
Varianza	0,09	0
Desviación estándar	0,121	0
Mediana	0	0,168
Máximo	0,755	0
Mínimo	0,313	0,598
Potencia	0,457	0
Energía	0,491	0
Kurtosis	0,877	0,006
Asimetría	0,548	0,02
RMS	0,709	0
Factor de Cresta	0,897	0,02

Fuente: los autores

### Comparación de la falla “g” con la falla h

El único valor que supera el límite de significancia p para la comparación entre estas fallas es del valor característico mínimo, en consecuencia, estas fallas incipientes cuentan con una diferencia estadísticamente significativa.

Tabla 7  
Comparación de la falla “g” con la falla h

Condición	g-h
Media	0
Varianza	0
Desviación estándar	0
Mediana	0,011
Máximo	0
Mínimo	0,659
Potencia	0
Energía	0
Kurtosis	0,002
Asimetría	0,001
RMS	0
Factor de cresta	0,008

Fuente: los autores

## Conclusiones

Las fallas incipientes generadas en el motor causan síntomas que no son perceptibles en las vibraciones mecánicas, al aplicar el método de tiempos cortos, estas fallas pudieron ser detectadas.

En la comparación de la muestra en condiciones estándares de funcionamiento denominada OK, con las fallas incipientes provocadas al motor, los valores característicos de Mediana, Media, Mínimo y No, tienen validez para el análisis debido a que estos valores no presentan diferencias significativas.

En la comparación entre diferentes tipos de fallas, los valores característicos Media, Mediana, Máximo y Mínimo presentan datos que no son de significancia para el análisis del proyecto.

En el análisis comparativo entre la muestra que presenta las condiciones estándares de funcionamiento y las fallas incipientes provocadas existe una mayor diferencia que cuando se comparan entre fallas.

El análisis de tiempos cortos permite simplificar la señal, conservando sus características originales y sin alterar o modificar la muestra tomada.

## Referencias bibliográficas

- Angamarca, J. y Soto, C. (2013). *Estudio de los efectos de la egr sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión crdi hyundai santa fé 2.0, mediante el análisis de vibraciones*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Auquilla, H. y Daniel, B. (2016). *Detección de fallas a través de análisis de vibraciones mediante la transformada de wavelets de un motor de combustión interna sonata 2.0 a gasolina (ingeniería)*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana .
- NORMA 10816-6. (9 de agosto de 2017). *mechanical vibration - evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW*. Recuperado de

- International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/standard/1553.html>
- Pesantez, R. y Zamora, P. (2015). *Caracterización del tipo de gasolina en función de la estequiometría de la mezcla y el encendido mediante el análisis de ruido de un motor ciclo Otto*. Cuenca: UPS.
- Rivera, N. y Chica, J. (2015). *Estudio del comportamiento de motor ciclo otto de inyección electrónica respecto a la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de Cuenca*. Quito: EPN.
- Minitab. (29 de julio de 2017). *¿Que es anova?* Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>
- Minitab. (12 de agosto de 2017). *what is a p-value?* Recuperado de <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/p-value-and-significance-level/what-is-pvalue/>.
- Vibraciones. (23 de octubre de 2015). *adashmexico.com*. Recuperado de 2016, de <http://adashmexico.com/a3716online.htm>
- Zurita, G., Haupt, D. y Agren, A. (2004). Reconstruction of cylinder pressure through multivariate data analysis: For prediction of noise and exhaust emissions. *Noise Control Engineering Journal*, 11.



# Diagnóstico de fallos del sistema de inyección de un motor de encendido provocado mediante inteligencia artificial

---

Néstor D. Rivera Campoverde<sup>1</sup>

Cristian L. García García<sup>2</sup>

Carlos C. Cepeda Landin<sup>3</sup>

Juan A. Rivera Caravajo<sup>4</sup>

## Resumen

El presente artículo establece un método para el diagnóstico de fallas de un motor de encendido provocado mediante el análisis de las señales de los sensores MAP, TPS y VSS, utilizando herramientas de aprendizaje y clasificación. En la actualidad se conoce diferentes métodos de inteligencia artificial utilizados para la detección de fallas en motores de combustión interna, mediante la lectura de las señales emitidas por los diversos sensores que establecen los parámetros de funcionamiento del motor. A través de las herramientas de aprendizaje y clasificación se genera un sistema que obedece las instrucciones impartidas por el operario, de esta manera se tiene un sistema que, basado en los síntomas, nos muestra el tipo y efecto del fallo presente en el motor. En base a esto se establece un diseño experimental para el diagnóstico de fallas mediante el análisis de las señales de los sensores, de esta forma se pretende determinar y detectar las fallas presentes en el motor de combustión interna de forma más exacta y minimizar el índice de gases contaminantes como CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, reduciendo como consecuencia la

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (cgarciag@ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (ccepedal@ups.edu.ec).
  - 4 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (jriverac1@ups.edu.ec).

contaminación ambiental y generando un ahorro de tiempo en la detección del fallo y en la corrección del mismo, optimizando así tiempos de trabajo y pérdidas económicas.

### Palabras claves

MSV, detección de fallos, árbol de decisión.

### Abstract

*The present article establishes a method for the diagnosis of failures of a motor of ignition provoked by the analysis of the signals of the sensors MAP, TPS and VSS using tools of learning and classification. At present, different artificial intelligence methods, used for the detection of failures in internal combustion engines, are known by reading the signals emitted by the various sensors that establish the engine's operating parameters. Through the learning and classification tools a system is generated that obeys the instructions given by the operator, in this way a system based on the symptoms shows the type and effect of the fault present in the engine. Based on this, an experimental design is established for the diagnosis of faults through the analysis of the signals of the sensors, in order to determine and detect the faults present in the internal combustion engine more accurately and to minimize the index of gases such as CO, HC, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, thus reducing environmental pollution and thus generating time savings in fault detection and correction, optimizing working times and economic losses.*

### Keywords

MSV, Fault Detection, Decision Tree.

## Introducción

El diagnóstico de fallas en motores de encendido provocado a través del análisis de las señales de parámetros de funcionamiento de los sensores del motor, es una técnica experimental que tiene como objetivo determinar las fallas presentes en el motor de combustión interna de una forma no intrusiva y generando menor costo de mano de obra.

Según González (2012), el principal objetivo del diagnóstico de fallas es brindar confiabilidad y disponibilidad del proceso, ofrecer la seguridad en la operación y evitar accidentes y daños. El diagnóstico de fallas permite determinar la ubicación, duración, tamaño y tipo de falla, basándose en los síntomas que presenta el sistema en general o en particular.

El proceso completo que permite detectar una falla y las acciones posteriores realizadas en base a la información obtenida, puede dividirse en tres etapas principales: detección, diagnóstico y corrección (Bas-seville, 2007).

La detección de fallas se basa en el análisis de residuos. Para la determinación se utiliza un modelo de ecuaciones que relaciona la señal de salida del sistema. El análisis o diagnóstico del residuo debe ser cuantificado y generar los síntomas del sistema. Lo que se busca con la evaluación de los residuos es determinar la falla o a su vez descartarla. Esta etapa tiene por objetivo definir si hay o no una falla en el sistema. La decisión conlleva buscar una corrección del fallo, esta constituye la última etapa en la que se determina y se clasifica las fallas de acuerdo a los métodos analíticos, inductivos, deductivos y experiencia del operador.

Existe un gran número de investigaciones, tanto teóricas como prácticas, de sistemas de detección y diagnóstico de fallas aplicados a motores de combustión interna. La mayoría de estas investigaciones se encuentran enfocadas en el diagnóstico de fallos con herramientas de aprendizaje y clasificación en motores de combustión interna, ya que cada investigador busca una forma diferente de resolver el problema en estos sistemas, ya sea en motores de encendido provocado o motores de encendido por compresión.

Una de las investigaciones que se ha realizado sobre el diagnóstico de fallas en motores de combustión interna utiliza modelos matemáticos computacionales respecto a las redes neuronales. En este artículo de Mahmood (2014) se propone una técnica eficaz y automatizada para diagnosticar las fallas. A diferencia de los métodos existentes en este campo, la señal emitida del motor de combustión interna se explota como el portador de información de las fallas.

Usando un sistema diferente de herramientas de aprendizaje y clasificación, Luini Leonardo Hurtado-Cortés (2016) presenta el estado actual de las técnicas de inteligencia artificial y su aplicación al campo de la detección y diagnóstico de fallas en sistemas dinámicos. Inicialmente, se explica una breve descripción de lo que se considera un mecanismo para la detección y diagnóstico de fallas, y los enfoques actuales para el estudio y la implementación de tales mecanismos. Posteriormente,



se presentan los resultados más importantes de las diversas técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la detección y diagnóstico de fallas.

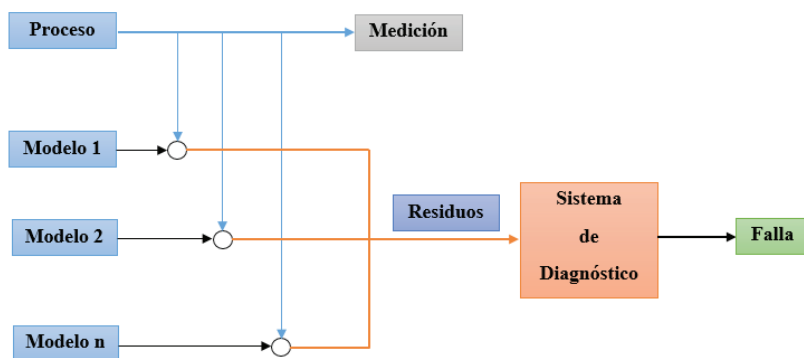
## Metodología

### Materiales y métodos

#### *Diagnóstico de fallas*

El diagnóstico de fallas es el uso de modelos. Este método se basa en el empleo de modelos del proceso para el estado normal y/o para cada una de las diferentes fallas que se desean observar, y posteriormente analizar qué tan parecidas son las estimaciones de cada modelo con las observaciones realizadas del proceso real, tal como se muestra en la figura 1. La forma de analizar las diferencias entre los modelos y las observaciones, llamados residuos, es muy variada, pasando desde los sistemas expertos, hasta complejas redes neuronales y máquinas de soporte vectorial.

Figura 1  
Diagnóstico de fallas en base a modelos



### *Herramientas de aprendizaje y clasificación*

Las herramientas de aprendizaje y clasificación entrenan modelos para clasificar los datos. Usando esta aplicación se puede explorar el aprendizaje supervisado de la máquina, usando varios clasificadores. Los tipos de clasificación incluyen árboles de decisión, máquinas de vector de soporte y clasificación de conjuntos. Puede realizarse el aprendizaje supervisado de la máquina suministrando un conjunto conocido de datos de entrada y respuestas conocidas a los datos. Los datos se utilizan para formar un modelo que genera predicciones para la respuesta a nuevos datos.

#### *Árboles de decisión*

Es una técnica centrada en métodos para el aprendizaje de modelos comprensibles, que simula el razonamiento del ser humano que se basan en sistemas de reglas. Este método está organizado de manera jerárquica, donde la decisión final a tomar se puede determinar seleccionando condiciones que se cumplen desde el nodo raíz del árbol hasta alguna de las hojas (Maldonado y Guevara, 2012).

#### *Máquinas de soporte vectorial*

Las máquinas de soporte vectorial (SVM) son sistemas de aprendizaje utilizado para la clasificación y regresión de conjuntos de datos de alta dimensión. Las SVM tienen grandes capacidades de resolución de problemas con gran cantidad de datos, pocas muestras de datos y problemas no lineales. Este sistema es utilizado para problemas de clasificación binaria. Las SVM generan datos de entrada para el entrenamiento y validación del sistema (Liu *et al.*, 2013).

### *Variables de análisis del sistema*

Para captar una variable se utiliza un sensor. La principal función de un sensor es transformar una magnitud física en una magnitud eléctrica. Son dispositivos o elementos electrónicos encargados de enviar las

señales de funcionamiento a la unidad de control ECU, para determinar el estado de funcionamiento del motor y tomar medidas de corrección para garantizar un buen desempeño del motor.

#### *Presión absoluta del colector de admisión*

La presión absoluta del colector de admisión en el motor es captada por el sensor MAP, que es el encargado de determinar la presión absoluta en el interior del colector de admisión. La presión medida es transformada en una señal eléctrica, que es enviada a la unidad de control ECU, con información que calcula el nivel de carga del motor, avance del punto de encendido y tiempo de inyección (González, 2015).

#### *Posición del acelerador*

La posición del acelerador es captada por el sensor TPS, que tiene como su principal función enviar a la ECU una señal que indica la posición de la mariposa de aceleración. El sensor está montado en el cuerpo de aceleración y convierte el ángulo de posición de la mariposa del cuerpo de aceleración en una señal eléctrica. De acuerdo a la posición de la mariposa, si esta se abre el voltaje de la señal incrementa, si la mariposa del cuerpo de aceleración reduce su apertura el voltaje disminuye (González, 2015).

#### *Velocidad del vehículo*

La velocidad del vehículo es captada por el sensor VSS, que es el encargado de medir la velocidad de transmisión, el sensor proporciona una señal de corriente alterna a la ECU la cual es interpretada como velocidad del vehículo. Este sensor es un generador de imán permanente montado en el transige, el imán genera una onda de corriente alterna que es directamente proporcional a la velocidad del vehículo. Al aumentar la velocidad del vehículo aumenta la frecuencia, entonces la ECU toma estos datos, los cuales informan al usuario de la velocidad de desplazamiento del vehículo (González, 2015).

## *Unidad experimental*

### *Vehículo de pruebas*

Para realizar las pruebas se utiliza el motor C14NE, que se muestra en la figura 2. El motor fue utilizado para el muestreo en parámetros de correcto funcionamiento, posteriormente para el desarrollo del experimento se aplicó algunas alteraciones en el funcionamiento del mismo. En la tabla 1, en cambio, se detallan las especificaciones del vehículo de pruebas.

Figura 2  
Motor C14NE



Fuente: los autores

Tabla 1  
Especificaciones del vehículo de pruebas

Especificación	Detalle
Tipo	Powertech 1,4 SOHC
Potencia máxima	83,7 HP @ 6 000 rpm
Torque	113,56 N.m @ 3 000 rpm
Cilindrada	1 398 cm3
Relación de compresión	9,5 : 1
Número de cilindros	4 en línea
Distribución	SOHC

Fuente: Granda y Herrera, 2017

*Analizador de gases*

En la figura 3 se muestra el analizador de gases modelo Qrotech QGA 6000, utilizado para obtener los valores de gases de combustión durante las pruebas realizadas, gases como CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y valores de Lambda y AFR. En la tabla 2, en cambio, se detallan las características del analizador de gases utilizado.

Figura 3  
Analizador de gases Qrotech NGA 6000



Fuente: los autores

Tabla 2  
Especificaciones generales del analizador de gases

Característica	Símbolo	Rango	Sensibilidad	Unidad
Monóxido de carbono	CO	0,00 - 0,99	0,01	%
Hidrocarburos	HC	0 - 9 999	1	ppm
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,0 - 20	0,10	%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,0 - 25	0,01	%
Óxidos nitrosos	NOx	0 - 5 000	1	ppm
Lambda	$\lambda$	0 - 2 000	0,001	—
Relación aire/combustible	AFR	0,0 - 99,0	0,1	—

Fuente: los autores

### *Tarjeta de adquisición de datos*

En la figura 4 se presenta la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6008, utilizada para la recopilación de datos. Mientras en la tabla 3 se especifican las características técnicas de la tarjeta de adquisición de datos.

Figura 4  
Tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6008



Fuente: National Instruments, 2017

Tabla 3  
Características tarjeta de adquisición DAQ USB 6008

Especificación	Detalle
Tipo de medida	Voltaje
Canales de entrada analógica	8
Resolución de entrada analógica	12 bits
Rango de voltaje máximo en la entrada analógica	-10 V hasta 10 V
Rango de voltaje mínimo en la entrada analógica	-1 V hasta 1 V
Canales de salida analógica	2
Rango de voltaje máximo en la salida analógica	0 V hasta 5 V
Rango de voltaje mínimo en la salida analógica	0 V hasta 5 V

Fuente: National Instruments, 2017

*Diseño experimental*

El diseño experimental es una forma más eficaz de obtener información acerca de un proceso que al ser analizado estadísticamente genera evidencia objetiva para la mejora y optimación de dicho proceso. El experimento plantea un cambio en las condiciones de funcionamiento del motor con el objetivo de medir el efecto del cambio de cada factor en el desempeño del motor, generando conocimiento acerca de cada uno de los procesos que se dan al interior del sistema a través del análisis de efectos generados en el desarrollo del experimento (Rivera y Chica, 2015).

*Tratamiento de datos*

Para evitar la introducción de errores debido a las imprecisiones que se pueden tener en los resultados de las mediciones realizadas, los datos obtenidos antes de ser utilizados deben ser validados. Los modelos estadísticos que se van a desarrollar dependen, entonces, de las limitaciones de precisión y exactitud.

### *Análisis de la base de datos mediante herramientas de aprendizaje y clasificación*

A partir de las pruebas realizadas se elabora una base datos en la que se presentan valores referentes a las variables de entrada, ruido, estudio y respuesta, como se mostró en la tabla anterior.

#### *Variables de entrada*

La señal de funcionamiento emitida por los sensores es determinada para nuestro experimento como la variable de entrada y para el desarrollo se utilizó los sensores: MAP, TPS y VSS.

#### *Variables de estudio*

Son también denominadas como los factores controlables. De igual forma son variables de entrada del sistema a experimentar, pero en este caso estas no influyen sobre las respuestas que se desea obtener del sistema.

#### *Variables de ruido*

Son las que presentan mayor dificultad durante el desarrollo del experimento, el funcionamiento del sistema se verá afectado de acuerdo a las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca. Al desarrollar el estudio sin controlar estas variables se tendrá comportamientos inadecuados en la respuesta del sistema.

#### *Variables de salida*

Los valores obtenidos durante las pruebas corresponden a las variables de salida. Estos valores fueron tomados de las emisiones captadas por el analizador de gases y las variables medibles en el banco de pruebas dinamométrico: Fuerza, Potencia, Emisiones contaminantes y Consumo. En la tabla 4 se muestra la matriz de diseño con 16 factores y en total se generan 109 tratamientos para el análisis estadístico.



Tabla 4  
Extracto de la matriz de experimento

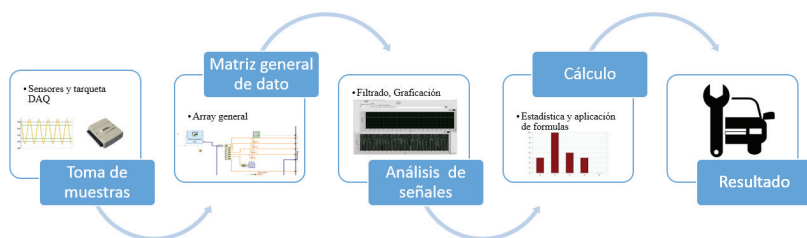
Falla	Esta- do	MAP	TPS	rpm	VSS	Con- sumo L/100 km	Consu- mo L/h	Fuerza	Po- tencia	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	λ	AFR
0	0	3,538	3,426	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,439	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,437	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,436	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,435	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,54	3,438	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,54	3,438	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,441	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,539	3,441	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,54	3,44	3 542	60	17,82	10,69	1 390	23,2	0,59	130	14,1	0,64	1,006	14,97
0	0	3,922	3,12	2 811	60	16,02	9,61	1 112	18,5	5,42	173	12,1	0,28	0,864	12,7
0	0	3,922	3,045	2 811	60	16,02	9,61	1 112	18,5	5,42	173	12,1	0,28	0,864	12,7
0	0	3,922	2,971	2 811	60	16,02	9,61	1 112	18,5	5,42	173	12,1	0,28	0,864	12,7

Fuente: los autores

## Desarrollo de las corridas experimentales

Para la elaboración del experimento se desarrolla un programa de adquisición de datos, el mismo que se elaboró con el software LabView. Mediante este programa se extraen las señales de funcionamiento de los sensores del vehículo a analizar, como son los sensores TPS, VSS y MAP. La función del programa es leer las señales en un determinado tiempo de muestreo y almacenar los datos de funcionamiento en una hoja de cálculo para su posterior clasificación y análisis. Para la toma de datos se dispuso del montaje del vehículo en el banco dinamométrico MAHA LPS 3000, donde se realizó la conexión de los sensores del vehículo al computador por medio de la tarjeta de adquisición de datos. También se ubicó el analizador de gases para la lectura de los valores de emisiones de gases generados durante las pruebas. En la figura 5 se puede apreciar la disposición de los equipos de muestreo.

Figura 5  
Secuencia de toma de datos



Fuente: los autores

## Fallas generadas

En la tabla 5 se presenta la descripción de los tres fallos que se ocasionaron en el motor C14NE.

Tabla 5  
Fallas generadas en el motor

Tipo de falla	Condición de la falla	Descripción de la falla
Falla 1	Dosado rico	Incorrecto desempeño de sensores
		Elevada presión de combustible
		Inyector defectuoso
		Regulador de presión defectuoso
		Filtro de aire tapado
		Conducto de retorno de combustible obstruido
Falla 2	Dosado pobre	Incorrecto desempeño de sensores
		Baja presión de combustible
		Inyector defectuoso
		Regulador de presión defectuoso
Falla 3	Bajo voltaje de encendido	Bujías desgastadas
		Cables de encendido defectuosos
		Bobina defectuoso
		Cableado de sensores defectuosos

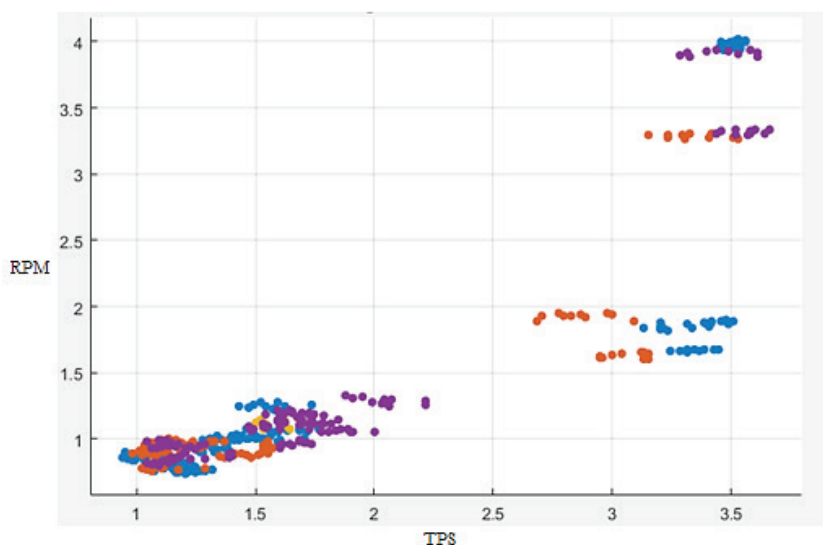
Fuente: los autores

**Análisis y resultados**

En la figura 6 se muestra la ventana diagrama de dispersión que crea círculos en las ubicaciones especificadas por los vectores X y Y. El diagrama de dispersión representa los pares de datos numéricos. Cada valor de una variable determina la posición del eje horizontal y el valor de la otra variable determina la posición en el eje vertical. Si las variables están correlacionadas, los puntos caerán a lo largo de una línea o curva. Cuanto mejor sea la correlación, más estrechos serán los puntos que abrazarán la línea. Las herramientas de aprendizaje y clasificación permiten distinguir en clases las fallas, consumos y diferenciar que el motor de combustión interna se encuentra estado OK o CON DEFECTO. Cada punto que se muestra en la gráfica representa las variables

obtenidas por los sensores MAP, TPS y VSS. La fiabilidad en este caso es del 98,6% en árboles de decisión y un 98,1% en SMV. La gráfica que tiene círculos de colores son valores acertados por la herramientas de aprendizaje y clasificación, caso contrario, cuando se marca con una X, es incorrecta la validación de los datos.

Figura 6  
Plataforma de trabajo de las herramientas de aprendizaje y clasificación



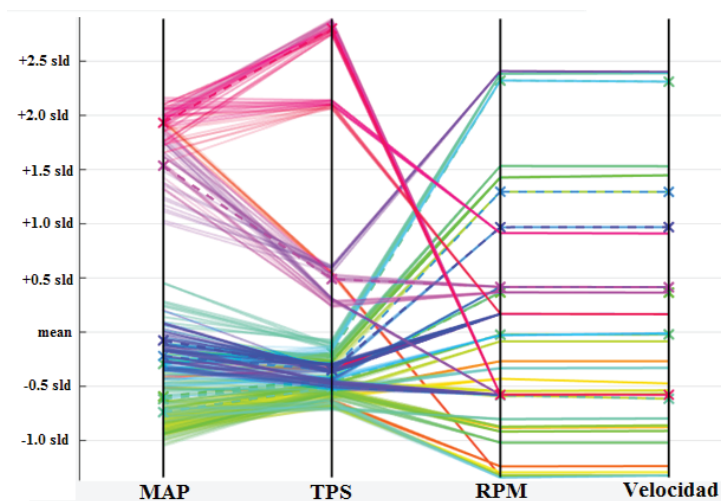
Fuente: los autores

### Índices de coordenadas

En la figura 7 se muestra la secuencia de los valores de coordenadas trazados en función de los índices de coordenadas. En un diagrama de coordenadas paralelas, cada variable recibe su propio eje y todos los ejes se colocan en paralelo entre sí. Como se observa en la figura, el eje vertical representa la desviación estándar, los valores de *mean* representan la media y valores debajo de *mean* representan las desviaciones

estándar. El diagrama de coordenadas paralelas contiene cuatro variables de entrada de los sensores MAP, TPS, VSS y las rpm, que nos darán información de las falla del motor de combustión interna. Cada variable se representa con colores y las variables más significativas son los valores de los sensores MAP y TPS, mientras las variables de las rpm y velocidad son valores menos significativas.

Figura 7  
Diagrama de coordenadas paralelas

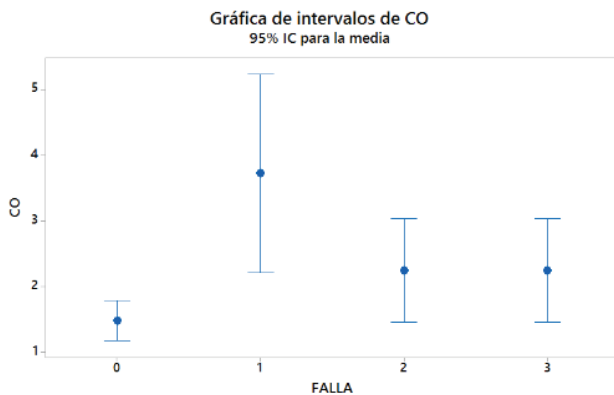


Fuente: los autores

### *Comportamiento del CO de acuerdo a los fallos provocados*

En la figura 8 se muestra la gráfica de intervalos del monóxido de carbono (CO), donde se observa que cuando no existe presencia de falla en el motor, el valor de CO se encuentra en los límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. En cambio, cuando se provoca alguna de las alteraciones que se explicó anteriormente, El porcentaje de CO aumenta considerablemente, superando así los límites máximos de emisiones permitidos.

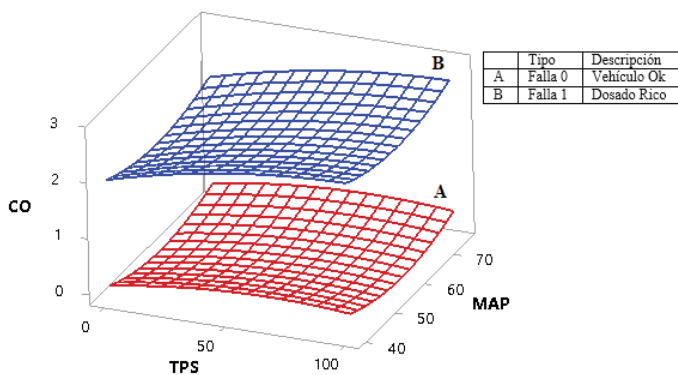
Figura 8  
Variación del CO de acuerdo a las fallas provocadas



Fuente: los autores

En la figura 9 se representa la gráfica de superficie de monóxido de carbono con respecto al dosado rico.

Figura 9  
Comportamiento del CO con dosado rico

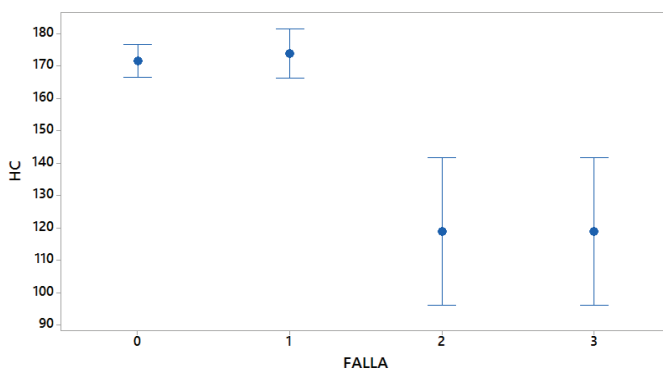


Fuente: los autores

### *Comportamiento del HC de acuerdo a los fallos provocados*

La figura 10 se muestra una gráfica de intervalos de hidrocarburos (HC), donde se observa que cuando no existe falla en el motor, el valor de HC se encuentra en los límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. En cambio, cuando se provoca alguna de las tres fallas que se explicó anteriormente, el porcentaje de HC aumenta con respecto al dosado rico, mientras que en el dosado pobre y a bajo voltaje de encendido, disminuyen los HC.

Figura 10  
Variación del HC de acuerdo a las fallas provocadas



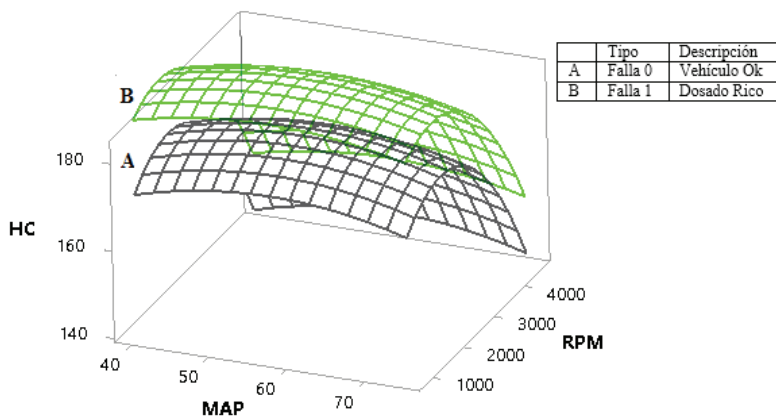
Fuente: los autores

El comportamiento de los HC como falla más significativa se muestra en la figura 11.

### *Comportamiento del CO<sub>2</sub> de acuerdo a los fallos provocados*

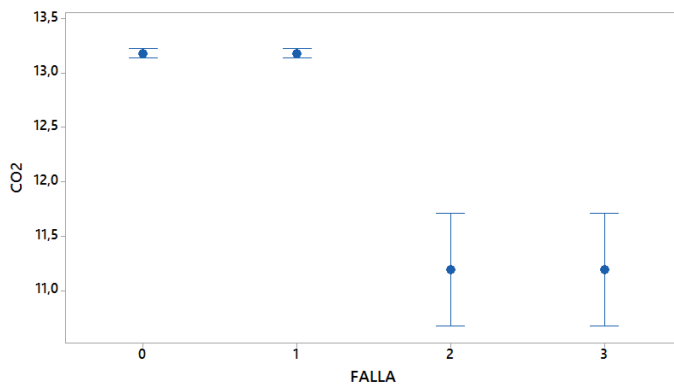
La figura 12 se muestra la gráfica de intervalos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), donde se observa que cuando no existe falla en el motor, el valor de CO<sub>2</sub> se encuentra en los límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. En cambio, cuando se provoca alguna de las tres fallas, el porcentaje de CO<sub>2</sub> varía según la falla.

Figura 11  
Comportamiento del HC con dosado rico



Fuente: los autores

Figura 12  
Variación del  $\text{CO}_2$  de acuerdo a las fallas provocadas

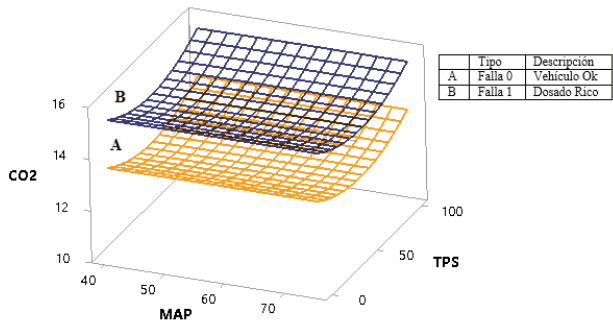


Fuente: los autores

El comportamiento del  $\text{CO}_2$  como falla más significativa se muestra en la siguiente figura:



Figura 13  
Comportamiento del CO<sub>2</sub> con dosado rico

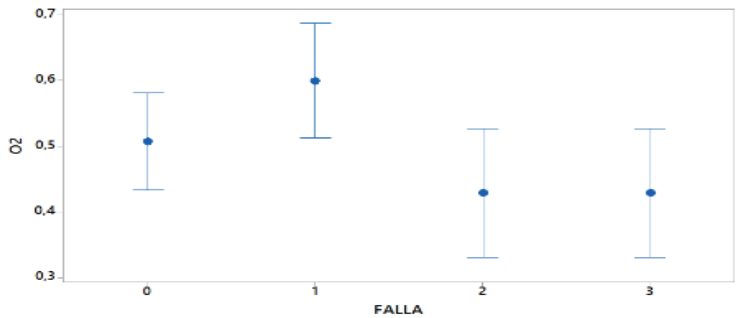


Fuente: los autores

*Comportamiento del O<sub>2</sub> de acuerdo a los fallos provocados*

La figura 14 se muestra una gráfica de intervalos de oxígeno (O<sub>2</sub>), donde se observa que cuando no existe falla en el motor, el valor de O<sub>2</sub> se encuentra en los límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. En cambio, cuando se provoca alguna de las tres fallas, el porcentaje de O<sub>2</sub> varía según la falla.

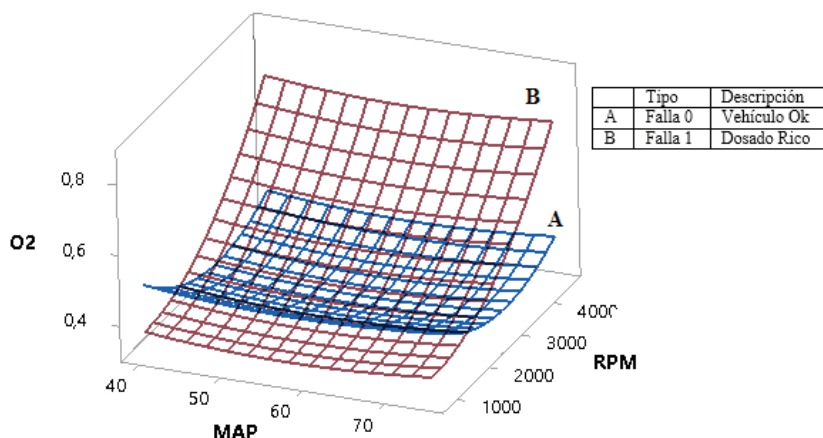
Figura 14  
Variación del CO<sub>2</sub> de acuerdo a las fallas provocadas



Fuente: los autores

El comportamiento de los  $O_2$  como falla más significativa se muestra en la figura 12.

Figura 15  
Comportamiento del  $CO_2$  con una presión de 60 psi



Fuente: los autores

## Conclusiones

Mediante el análisis de fallas se pretende optimizar el tiempo que se utiliza en determinar las fallas que se presentan en los parámetros de funcionamiento del motor de combustión interna. En el campo mecánico se recurre a la experticia del ser humano para la corrección de fallos presentes en el motor de combustión interna. Mediante este entrenamiento se obtiene de forma acertada la determinación del fallo ahorrando tiempo y costos de operación.

Al generar fallas de dosado rico, dosado pobre y bajo voltaje de encendido en un motor de combustión interna, existen como consecuencias exceder los límites máximos permitidos de los gases contaminantes para motores de encendido provocado. Los resultados de estudio

muestran que la falla de dosado rico es más significativa en comparación a las otras dos fallas, ya que dicha falla aumenta los gases contaminantes, mientras que al generar las fallas por dosado pobre y bajo voltaje de encendido no afecta de forma significativa a los niveles de emisiones.

Las herramientas de aprendizaje y clasificación permiten distinguir entre clases las fallas y diferenciar si el motor de encendido provocado se encuentra en buen estado o existe presencia de algún tipo de falla. Al interferir en el correcto funcionamiento, generar fallas de dosado rico, dosado pobre y bajo voltaje de encendido en un motor de combustión interna, existen consecuencias como exceder los límites máximos permitidos de los gases contaminantes. El porcentaje de validez es mayor al 90 %, por lo que el sistema es aplicable en la detección de fallas en motores de combustión interna.

## Referencias bibliográficas

- Acosta, J. A. y Nieto, J. P. (2014). *Detección y diagnóstico de fallas para la dinámica lateral de un automóvil*. México: COMIMSA.
- Basseville, M. y. (noviembre, 2007). *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*. Recuperado de <http://www.irisa.fr/sigma2/kniga/>
- Carrasco, R. A. (agosto, 2007). *Detección y diagnóstico de fallas en robots móviles cooperativos*. Santiago de Chile: Pontifica Universidad Católica.
- González, D. (2015). *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*. Madrid: Paraninfo.
- González, M. (2012). *Diagnóstico de fallas en un motor*. Cuernavaca: Centro Nacional de Investigación.
- Granda, I. y Herrera, D. (marzo, 2012). *Diseño y construcción de una maqueta funcional*. Quito: UTE. Recuperado de [repositorio.ute.edu.ec/bits-tream/123456789/4827/1/48108\\_1.pdf](http://repositorio.ute.edu.ec/bits-tream/123456789/4827/1/48108_1.pdf)
- Liu, B., Hou, D., Pingjie, H., Banteng, L. y Huayi, T. (2013). *An improved PSO-SVM model for online recognition*. 367-385.
- Luini, L. y Hurtado-Cortés, E. L. (2016). *Fault detection and diagnosis through artificial intelligence*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

- Mahmood, Y. S. (mayo, 2013). *Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Extension Neural Network*. Jordania.
- Maldonado, C. y Guevara, B. (2012). *Reconocimiento de patrones para árbol de decisión*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- National Instruments. (julio, 2017). *USB-6008*. Recuperado de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>
- Rivera, N. y Chica, F. (2015). *Estudio del comportamiento de un motor ciclo Otto de inyección electrónica respecto de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de Cuenca*. Quito: EPN.



# Propuesta de un GMAO para la gestión del mantenimiento de un sistema ferroviario

---

Milton García<sup>1</sup>

Renato Fierro<sup>2</sup>

Andrés Berrezueta<sup>3</sup>

Cristian Siguencia<sup>4</sup>

## Resumen

El presente proyecto técnico está basado en la propuesta de un Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) para los nuevos sistemas de transporte masivo que se encuentran en desarrollo en el país como el Metro de Quito, la Aerovía de Guayaquil y el Tranvía de Cuenca, debido a que no se cuenta con una gestión integral de mantenimiento para estos sistemas. Por medio de un estudio bibliográfico y del estado del arte, se determinaron los sistemas y subsistemas ferroviarios con sus componentes, así como la manera en que deben ser gestionados. Se identificaron cuatro grandes sistemas: material rodante, infraestructura ferroviaria, suministro de energía y red de comunicaciones. Posteriormente se desarrollaron mapas conceptuales y diagramas de flujo para cada sistema, luego se conformó una base de datos en la que se incluyeron todos los sistemas ferroviarios y sus respectivos subsistemas. Finalmente se conformaron siete módulos con los cuatro sistemas ferroviarios incluyendo recursos humanos, repuestos y gestión de mantenimiento, y se realizó la interconexión entre cada uno de ellos, dependiendo de la forma en que se relacionan entre sí.

## Palabras clave

Gestión de mantenimiento, GMAO, material rodante, mantenimiento, módulos, sistemas ferroviarios.

- 
- 1 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte GIIT. Universidad Politécnica Salesiana.
  - 2 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte GIIT. Universidad Politécnica Salesiana.
  - 3 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte GIIT. Universidad Politécnica Salesiana.
  - 4 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte GIIT. Universidad Politécnica Salesiana.

**Abstract**

*This technical project is based in the plan of Computer Assisted Maintenance Management (CMMS) to the new systems of massive transportation that are in development in the country such as Subway in Quito, Airway in Guayaquil and Trolley Car in Cuenca, because they don't have an Integrated Maintenance Management for themselves. The rail systems and subsystems with their components and how they can be managed were determined through a bibliographic study and art state about rail systems and maintenance managements systems. Four major systems were identified: rolling stock, rail infrastructure, energy supply and communication network. Web maps and flowcharts were developed with all collected information for each system to form a database to include all rail systems and their subsystems. Finally, seven modules were formed which are Rolling Stock, Rail Infrastructure, Energy Supply, Communication Network, Human Resources, Spare parts and Maintenance Management and we proceeded to make the interconnection among the modules, depending how they relate one each other.*

**Keywords**

*Maintenance management, CMMS, rolling stock, maintenance, modules, rail systems.*

**Introducción**

En las tres principales ciudades del Ecuador se encuentran en desarrollo importantes y novedosos sistemas eléctricos de transporte masivo los cuales trasladarán entre 40 000 y 370 000 pasajeros diarios (*El Universo*, 22/06/2011) con velocidades entre 17 y 37 km/h (*El Universo*, 13/05/2015), lo que supondrá una disminución en el tránsito vehicular así como mayor seguridad, menores tiempos de traslado y mayor comodidad en los pasajeros. Estos proyectos son el Metro de Quito, la Aerovía en Guayaquil y el Tranvía de Cuenca (*El Tiempo*, 08/06/2011). El presente proyecto tiene como objetivo principal proponer un GMAO para la gestión del mantenimiento de estos sistemas ferroviarios.

Se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva de sistemas ferroviarios y gestión del mantenimiento, basándose en el estado del arte, para poder determinar todos los sistemas y subsistemas que componen la estructura ferroviaria y la manera en que se deben gestionar todos estos componentes de forma adecuada, finalizando con la conformación de cada uno de los módulos y la interconexión entre ellos.

**Fundamentación teórica**

Los sistemas ferroviarios están compuestos por varios elementos necesarios para su correcto funcionamiento. Cuentan con infraestruc-

turas para la generación de corriente así como para el mantenimiento de las unidades móviles. Todos estos elementos requieren de una correcta gestión de mantenimiento para alargar su vida útil y disminuir costos.

### *Sistemas ferroviarios*

Son sistemas de transporte terrestre que utilizan vagones guiados sobre dos carriles de hierro dispuestos de forma paralela. En principio fue desarrollado como un sistema de transporte de carga, pero con el tiempo se popularizó y se convirtió en un medio de transporte para personas (Iruete, 2008).

### *Mantenimiento*

Es la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinada a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida (GMAO, 2010).

Figura 1  
Metodologías de implementación de mantenimiento



Fuente: los autores



## *Gestión de mantenimiento asistido por ordenador (GMAO)*

La gestión de mantenimiento asistida por ordenador (GMAO) es una herramienta informática encargada de la gestión de las actividades de mantenimiento. Comprende una base de datos que contiene información de la empresa, almacén, equipos, empleados y operaciones que se llevan a cabo en el departamento de mantenimiento.

### *Estado del arte*

Hoy en día las actividades empresariales precisan de una adecuada gestión de mantenimiento para todos sus activos físicos, de tal manera se contribuya a su competitividad, mejorando los procesos de calidad y buscando el mejoramiento continuo. La actual gestión de mantenimiento incluye todas las actividades destinadas a determinar objetivos y prioridades de mantenimiento, responsabilidades y estrategias, facilitando así la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento. Esta gestión actual de mantenimiento busca reducir los costos globales de la actividad productiva, asegurar el buen funcionamiento de los equipos, disminuir al máximo los riesgos para las personas y los efectos negativos sobre el medio ambiente mediante una mejora continua (Viveros *et al.*, 2015).

La importancia de una correcta gestión de los activos físicos y el rápido avance de la tecnología han permitido desarrollar programas informáticos enfocados en la gestión del mantenimiento, los cuales han ido evolucionando con el tiempo como se explica a continuación.

En 1995 se propuso un sistema CMMS basado en el software AutoCAD 12 de Autodesk, para el mantenimiento de una empresa manufacturera (Ardila *et al.*, 2015). En 1998 se empleó un CMMS por medio de un software compuesto por módulos interconectados para gestionar órdenes de trabajo, programación de mantenimiento preventivo, historial

de mantenimiento, control de stock, compras y presentación de informes (Ardila *et al.*, 2015). En 2007 se planteó un modelo para la gestión de fallos en los procesos industriales por medio de la retroalimentación y la toma de decisiones en la planificación de tareas de mantenimiento, ejecutando tareas específicas de mantenimiento preventivo y correctivo; se desarrolló un prototipo del sistema en Java (Aguilar *et al.*, 2007). En 2013 se presentó un nuevo sistema, integrando herramientas de realidad aumentada y asistidas por ordenador para proporcionar apoyo a los técnicos en las tareas de mantenimiento mediante la realidad mixta, permitiendo un acceso intuitivo y de fácil comprensión (Botelho *et al.*, 2013). En 2014 se presentó un novedoso sistema móvil, basado en identificación por radiofrecuencia y tecnologías de código de barras 2D, logrando la integración de tecnologías de información como los teléfonos inteligentes y las agendas electrónicas, su aplicación demostró mejoras en el proceso de mantenimiento en un laboratorio de construcción (Lin *et al.*, 2014).

Los diversos software que se pueden encontrar en el mercado se adaptan en su mayoría a las necesidades de cada empresa, por ejemplo, el software GIM (gestión integral de mantenimiento) es compatible con Windows, Android, iOS y W.Mobile, trabaja mediante una integración de los departamentos de mantenimiento planificado y no planificado, organización de activos, almacén, recursos humanos, entre otros (Coello y Gallegos, 2015). Por otro lado, el programa Prisma II es una herramienta utilizada para optimizar las políticas de mantenimiento mediante el análisis estructurado de la información. Permite una implantación progresiva gracias a su modularidad y cumple los principales estándares mundiales. Por medio del Internet proporciona un mensaje de alerta y lo transforma en una orden de trabajo enviándola a un teléfono móvil en tiempo real. El software Maximo en cambio facilita la toma de decisiones basadas en datos, requerimientos, recursos disponibles y condiciones de seguridad, de esta manera se generan importantes ahorros y se prolonga la vida útil de los activos. Su estructura interna está orientada a facilitar la búsqueda e introducción de información y la generación de análisis (Coello y Gallegos, 2015). Por otro lado, el software SisMAC

(Sistema de Mantenimiento Asistido por Computadora) tiene una gran facilidad para adaptarse a cualquier tipo de empresa debido a su interfaz de usuario amigable. Es una poderosa herramienta que ayuda a reducir costos de mantenimiento y maximizar la disponibilidad de los bienes. Puede asignar a cada uno de los bienes y equipos información técnica computarizada como planos, fotografías digitales, imágenes, etc.

## Metodología

La investigación desarrollada fue del tipo exploratoria, para poder abordar los nuevos sistemas ferroviarios que se están desarrollando y que requieren una gestión de mantenimiento; de campo, realizando una recopilación de información basada en los nacientes proyectos ferroviarios en el país, como por ejemplo, el proyecto del tranvía de la ciudad de Cuenca; y descriptiva con el fin de obtener datos reales que sirvan como soporte en la selección y definición de los diferentes módulos y sus componentes para desarrollar la propuesta de GMAO.

## Sistemas ferroviarios

El primer punto del presente estudio fue la identificación de los diferentes sistemas y subsistemas que conforman la estructura ferroviaria, basándonos en el estudio del estado del arte de diferentes fuentes bibliográficas y con una investigación de campo apoyada en los proyectos ferroviarios actuales en el país, se determinó cuatro grandes sistemas: Material Rodante, Infraestructura Ferroviaria, Suministro de Energía y Red de Comunicaciones, cada uno de los cuales se subdivide en distintos componentes. Con esta información se conformaron los diferentes sistemas con sus respectivos subsistemas como se indica a continuación:

### *Material Rodante*

1. Carrocería.
2. Bogie motor: tracción, bastidor, frenos, reductores, suspensión, ejes y ruedas.

3. Bogie remolque: bastidor, frenos, suspensión, ejes y ruedas.
4. Captación de corriente: pantógrafos, captadores de corriente, baterías, generadores y convertidores auxiliares.
5. Sistemas auxiliares: equipo neumático, sistema de puertas, sistema de climatización y sistema de iluminación.

### *Infraestructura Ferroviaria*

1. Vía:
  - Componentes de vía: carril, durmiente, balasto, vía sobre placa de hormigón y sujeciones.
  - Sistema de líneas subterráneas: ventilación de líneas, alumbrado de túneles, climatización de líneas, detección y protección contra incendios, bombeo de aguas en líneas y propagación del humo en túneles.
  - Señalización convencional: señalética y semaforización.
2. Sistema y equipamiento de estaciones:
  - Infraestructura de servicio, megafonía informativa, telefonía pública y televisión.
3. Talleres y cocheras:
  - Máquinas herramienta: sierra sin fin, taladro de columna, torno y fresadora.
  - Máquinas especiales: gira *bogies*, puentes grúa, máquinas de lavado, cabinas de pintura y torno con sistema de tracción.
  - Máquinas complementarias: sierra de arco, gatos móviles, prensa hidráulica, bancos de trabajo, sistema de drenaje, bancos de pruebas, sistema de distribución de lubricantes y sistema de limpieza.

### *Suministro de energía*

1. Subestación de alta tensión: sección de alta tensión, sección de transformadores de alta tensión a media tensión y sección de servicios auxiliares.

2. Subestación rectificadora: sección de media tensión, sección de transformadores de media tensión a corriente continua y sección de corriente continua.
3. Sistema de alimentación:
  - Alimentación de tracción: línea aérea de contacto (catenaria, postes, péndolas, sustentador, ménsulas, *feder* de acompañamiento e hilo de contacto) y alimentación por suelo (tercer carril).
  - Alimentación para equipos de mando y control.
  - Retorno de corriente: conexión entre riel y subestación.
  - Sistema de tierra: conexión de equipos a la barra de tierra.

#### *Red de comunicaciones:*

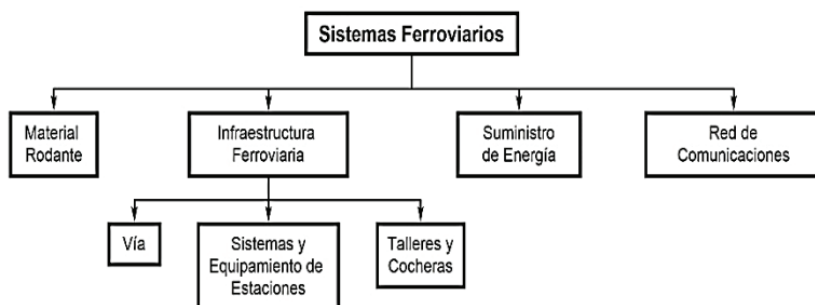
1. Radiocomunicaciones: control de mando, emisores, receptores y antenas.
2. Sistema de protección automática (ATP): balizas emisoras y antenas receptoras.
3. Sistema de operación automática (ATO): balizas emisoras y antenas receptoras.

En base a la información obtenida de las fuentes bibliográficas y para una mejor visualización se desarrolló un mapa conceptual general, que contiene todos los sistemas con sus respectivos subsistemas. En la figura 2 se muestra el mapa conceptual de los sistemas ferroviarios y sus subsistemas.

### *Diagramas de flujo*

Luego de la obtención y jerarquización de los sistemas y subsistemas mediante mapas conceptuales se procedió a realizar un diagrama de flujo que esquematiza el proceso de funcionamiento del sistema ferroviario.

Figura 2  
Mapa conceptual sistemas ferroviarios



Fuente: los autores

### *Material rodante*

En lo que tiene que ver con material rodante, el proceso inicia con la captación de corriente que puede ser por catenaria o tercer carril, la misma que es almacenada en las baterías y posteriormente pasa a los convertidores y generadores auxiliares, los cuales transforman la corriente para que pueda ser utilizada por los distintos sistemas como iluminación, equipos neumáticos y motores de tracción para el movimiento del tren por medio de los *bogies*, suspensión, ejes y finalmente las ruedas que entran en contacto con los carriles.

### *Infraestructura ferroviaria*

En cuanto a la infraestructura ferroviaria el proceso inicia en la vía con los carriles, durmientes y las respectivas sujeciones, ya sea vía en placa o balasto. Además, se cuenta con distintos sistemas de control y ayuda para los túneles en el caso de metros, como son protección contra incendios, alumbrado, ventilación, entre otros. La señalética y semaforización son otros de los subsistemas con los que se cuenta y son importantes para evitar accidentes permitiendo una correcta interacción entre los peatones, vehículos de transporte público y privado y los tranvías o metros.

Los sistemas y equipamiento de estaciones permiten informar a los usuarios sobre horarios de salidas de los trenes y avisos de seguridad por medio de televisión, megafonía informativa y telefonía pública. La infraestructura de servicio contempla los ascensores, escaleras eléctricas y pasillos rodantes, necesarios para la comodidad de los usuarios. Los talleres y cocheras son los lugares destinados al almacenamiento y mantenimiento de los vehículos ferroviarios.

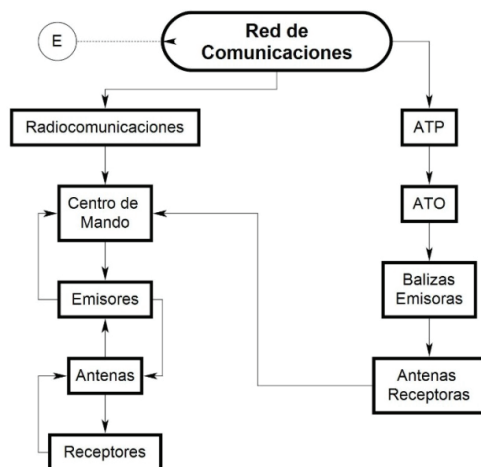
### *Suministro de energía*

El suministro de energía es proporcionado a todos los subsistemas que así lo requieren para su correcto funcionamiento. El proceso inicia con la alta tensión tomada de la red pública, luego la corriente es transformada a corriente de media tensión y posteriormente es rectificada a corriente continua, la cual es utilizada para el sistema de alimentación que abastece a los vehículos ferroviarios por medio de catenaria o tercer carril, al entrar en contacto con los pantógrafos o captadores de corriente, respectivamente. Además, se abastece de corriente a toda la infraestructura ferroviaria como son los sistemas de líneas subterráneas, semaforización, sistemas y equipamiento de estaciones, talleres y cocheras y red de comunicaciones.

### *Red de comunicaciones*

La red de comunicaciones permite una interacción entre los vehículos ferroviarios, la infraestructura ferroviaria y el centro de control. Por medio de antenas, emisores y receptores son enviadas todas las señales de aviso entre conductores, personales del centro de control y estaciones de pasajeros. Además, existen señales de velocidad, apertura y cierre de puertas, parada en estaciones, entre otras, en vehículos equipados con ATP o ATO los cuales son sistemas de supervisión, conducción semiautomática y automática. En la figura 3 se muestra el diagrama de flujo del sistema Red de Comunicaciones en donde se observa cómo interactúan cada uno de sus componentes.

Figura 3  
Diagrama de flujo de Red de Comunicaciones



Fuente: los autores

## Desarrollo de la base de datos

El desarrollo de la base de datos se realizó conforme al estudio bibliográfico de los sistemas ferroviarios, a la recopilación interna y externa utilizada para este proyecto y a la información facilitada para los sistemas que se están desarrollando en el país. La base de datos se compone de los cuatro sistemas ferroviarios: Material Rodante, Infraestructura Ferroviaria, Suministro de Energía y Red de Comunicaciones, así como sus respectivos subsistemas; además, se incluyeron los aspectos secundarios pero importantes como los repuestos y el personal.

### *Estructura para la codificación de sistemas ferroviarios*

La codificación de los equipos se debe realizar tomando en consideración la siguiente estructura:

ZY – YYX – NN – XX



Como se observa, los códigos pueden estar representados por nueve dígitos separados por guiones, dependiendo del número de componentes que conformen cada sistema. La designación de los primeros dígitos ZY corresponde a los sistemas ferroviarios representada por MR para Material Rodante, IF para designar a la Infraestructura Ferroviaria, SE para denotar el Suministro de Energía y RC para la Red de Comunicaciones, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 1  
Siglas sistema-nombre del sistema ferroviario

Siglas	Sistemas
MR	Material Rodante
IF1	Infraestructura Ferroviaria
SE1	Suministro de Energía
RC1	Red de Comunicaciones

Fuente: los autores

La designación de los dígitos YYX indica el tipo de subsistema y pueden tener tres posibles dígitos dependiendo de la nomenclatura que se ha optado para cada subsistema. En la tabla 2 se muestra la codificación.

Tabla 2  
Tipos de subsistemas

Tipo	Subsistemas
C	Carrocería
BM	Bogie Motor
BR	Bogie Remolque
CC	Captación de Corriente
SA	Sistemas Auxiliares
V	Vía
SEE	Sistema y Equipamiento de Estaciones
TC	Talleres y Cocheras

Tipo	Subsistemas
SAT	Subestación de Alta Tensión
SR	Subestación Rectificadora
SA	Sistema de Alimentación
R	Radiocomunicaciones
ATP	Protección Automática del Tren
ATO	Operación Automática del Tren

Fuente: los autores

## Resultados

Una vez que se ha recolectado y plasmado toda la información referente a sistemas ferroviarios y gestión de mantenimiento, procedemos a la conformación de cada uno de los módulos. En total contamos con siete módulos divididos en material rodante, infraestructura ferroviaria, suministro de energía, red de comunicaciones, recursos humanos, gestión de mantenimiento y repuestos. La interconexión entre cada uno de los módulos se da de la siguiente manera:

*Módulo de material rodante.* Se conecta con el de infraestructura ferroviaria debido a la conexión directa que tienen las ruedas con la vía.

Figura 4  
Interconexión material rodante



Fuente: los autores

*Módulo de suministro de energía.* Tiene conexión con los de material rodante, infraestructura ferroviaria y red de comunicaciones debido a que alimenta a estos sistemas con corriente ya sea para el movimiento de los vehículos ferroviarios, para el funcionamiento de los elemen-

tos de la infraestructura como escaleras eléctricas, ascensores, sistemas de líneas subterráneas, semaforización, equipos de talleres y cocheras y los elementos de red de comunicaciones como emisores, receptores y antenas.

Figura 5  
Interconexión suministro de energía



Fuente: los autores

*Módulo de red de comunicaciones.* Se relaciona con el de material rodante e infraestructura por medio de los emisores, receptores y antenas presentes en estos dos sistemas para poder tener información en tiempo real y realizar una toma de decisiones correctas.

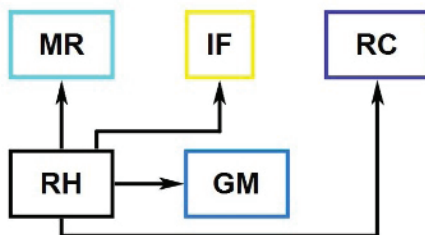
Figura 6  
Interconexión red de comunicaciones



Fuente: los autores

*Módulo de recursos humanos.* Se conecta con los de material rodante, infraestructura ferroviaria, gestión de mantenimiento y red de comunicaciones debido a que en cada uno de estos sistemas se requiere personal tanto de operaciones ferroviarias para la conducción de vehículos, manejo del centro de control y subestaciones, como personal de mantenimiento para los mismos vehículos y toda la infraestructura.

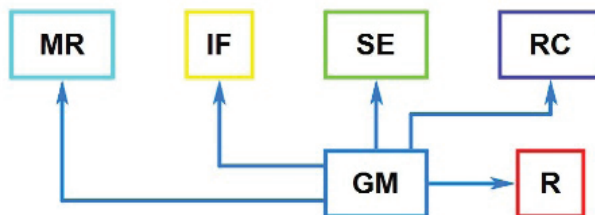
Figura 7  
Interconexión recursos humanos



Fuente: los autores

*Módulo de gestión de mantenimiento.* Tiene relación con los de material rodante, infraestructura ferroviaria, suministro de energía, red de comunicaciones y repuestos, debido a que se debe gestionar de una manera adecuada y dar mantenimiento a todos y cada uno de estos activos.

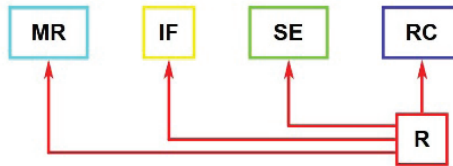
Figura 8  
Interconexión gestión de mantenimiento



Fuente: los autores

*Módulo de repuestos.* Tiene conexión con los de material rodante, infraestructura ferroviaria, suministro de energía y red de comunicaciones porque en cada uno de estos módulos se requieren repuestos para cada uno de sus componentes.

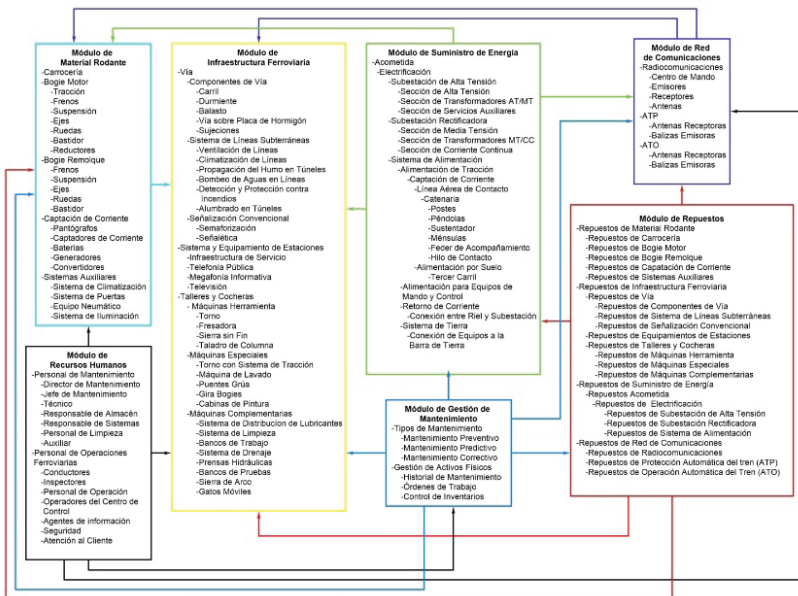
Figura 9  
Módulo de repuestos



Fuente: los autores

Finalmente, la figura 10 esquematiza el funcionamiento total de la propuesta del GMAO, donde se observa la interconectividad que el mismo requiere.

Figura 10  
Interconexión de módulos



Fuente: los autores

## Conclusiones

La revisión bibliográfica permitió tener una base sólida para la realización del proyecto, en donde se definieron los distintos sistemas y subsistemas ferroviarios y la manera en que deben ser gestionados correctamente. La propuesta está basada en datos actualizados de sistemas ferroviarios, equipos, personal, herramientas, distribuidores de repuestos y proveedores, gestión de mantenimiento, el diagnóstico de fallas y programas existentes en el mercado para generar un programa de gestión integral.

Se realizó una revisión sobre normativas y valores permisibles de funcionamiento ferroviario para poder establecer las condiciones bajo las cuales se desarrolló la propuesta de GMAO.

En esta propuesta se han especificado los esquemas fundamentales de los módulos que son utilizados en el desarrollo de un GMAO, en la que se definen interrelaciones de todo lo que es un sistema ferroviario, de sus conexiones de estaciones y subestaciones con los diferentes módulos presentados en este documento. Además, el GMAO propuesto permite tener la disponibilidad de repuestos que se consideran indispensables para su acopio y controlará la cantidad en *stock* necesario para la bodega de los talleres, generada por un ordenador para realizar los mantenimientos pertinentes de acuerdo a la planificación establecida en esta propuesta.

## Referencias bibliográficas

- Ardila, J., Ardila, M. I., Rodríguez, D. e Hincapié, D. (2016). La gerencia del mantenimiento: una revisión. *Dimensión Empresarial*, 14(2), 127-142. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.15665/rde.v14i2.480>
- Botelho, S., Bueno, D., Fumagalli, L., Garetti, M., Pereira, C. y Ventura, R. (2013). A model-based approach for data integration to improve maintenance. *Computers in Industry*, 64(4), 376-391. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.01.002>

- Cerrada, M., Cardillo, J. Aguilar, J. (2006). Agent-based maintenance management system for the distributed fault tolerance. *IFAC Proceedings*, 39(13), 938-943. Recuperado de <https://doi.org/10.3182/20060829-4-CN-2909.00156>
- Coello, G. y Gallegos, J. (2015). *Desarrollo de un software para la gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada para la prefectura del Azuay*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7674>
- El Tiempo*. (08/06/2011). Tranvía en proceso de diseño preliminar.
- El Universo*. (22/06/2011). La línea del metro de Quito será subterránea.
- El Universo*. (13/05/2015). Transporte aerosuspendido de Guayaquil se llamará Aerovía.
- GMAO. (2010). *Sistemas de gestión de mantenimiento asistido por ordenador requerimientos y funcionalidades*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- González F. (2003) *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid: Fundación Confemetal
- Irueste Lobo, J. (2008). *Mantenimiento de material rodante ferroviario*. Madrid: Inversiones Editoriales Dossat.
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L. y Crespo, A. (2015). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1), 125-138. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011>
- Yu-Cheng, L., Weng-Fong, Ch. y Fu-Cih, S. (enero, 2014). Developing mobile 2D barcode/RFID-based maintenance. *Automation in Construction*, 37110-121. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.004>

# Diagnóstico de fallas en motores de combustión interna mediante termografía usando lógica difusa

Néstor D. Rivera Campoverde<sup>1</sup>

Jairo D. Castillo Calderón<sup>2</sup>

Ángel Y. Aguilar Romero<sup>3</sup>

Andrea K. Bermeo Naula<sup>4</sup>

## Resumen

En el desarrollo de este artículo se presenta un sistema de detección de fallas basado en lógica difusa, para ello se desarrolla un modelo difuso incorporado en un motor CRDI 2.0 Hyundai Santa Fe. Las diferentes variables de entrada consideradas para el estudio se obtuvieron mediante un scanner automotriz. La base de reglas del sistema se desarrolla tomando en cuenta los conocimientos teóricos, los resultados del diseño experimental y fundamentalmente basados en el conocimiento del experto. La precisión del clasificador difuso se prueba basándose en los estudios experimentales que se realizan en diferentes condiciones de fallo del motor. Este sistema difuso diagnostica el grado de obstrucción del escape y del sistema de recirculación de gases de escape EGR, fallas en el motor de combustión interna, basado en dos métodos no intrusivos: el flujo de datos del scanner y el análisis termográfico, con los que se pueden detectar fallas sin necesidad de detener y desarmar el motor, lo que ahorra tiempo y dinero.

## Palabras claves

Lógica difusa, controlador difuso, método no intrusivo, diagnostico de fallas.

## Abstract

*In developing this paper a system fault detection based on fuzzy logic, for it a fuzzy model built on an engine Hyundai Santa Fe 2.0 CRDI is developed is presented. The different input variables consid-*

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (jcastillo@est.ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (aaguilar@ups.edu.ec).
  - 4 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (abermeeon@ups.edu.ec).



*ered in the study were obtained through an automotive scanner. The rule base system is developed taking into account the theoretical knowledge, the results of experimental design and mainly based on expert knowledge. The accuracy of the fuzzy classifier test based on experimental studies carried out in different conditions of engine failure. This fuzzy system diagnoses the degree of obstruction exhaust system and exhaust gas recirculation EGR, failures in the internal combustion engine, based on two non-intrusive methods, data flow and thermographic analysis scanner, with which faults can be detected without having to stop and disarm the engine, which saves time and money.*

**Keywords**

*Fuzzy logic, fuzzy controller, non-intrusive method, fault diagnosis.*

## Introducción

Actualmente, el sector automotriz exige el desarrollo y uso de vehículos más seguros y fiables, por lo cual el mantenimiento basado en métodos no intrusivos es una técnica que se utiliza mucho más hoy en día y por ende se encuentra en constante desarrollo.

Los costos y el tiempo que implica cuando un motor se detiene para realizar un mantenimiento pueden llegar a ser elevados, en muchos casos para determinar cuál es la falla correcta puede resultar un trabajo complejo, debido a que se desconoce la causa del desperfecto, además, el mal funcionamiento de este puede provocar la generación de otra anomalía.

La implementación del mantenimiento predictivo es indispensable para predecir las tareas de reparación en determinados equipos, de esta manera se logra alargar su vida útil y se reduce el costo de mantenimiento. Por eso es importante determinar la falla en el momento en que se produce y llevar a cabo la reparación. Esto se puede lograr de una manera muy eficiente haciendo uso de la técnica no intrusiva que se propone en el desarrollo de esta investigación.

Hoy en día, el uso de la lógica difusa para el diagnóstico de fallas en motores de combustión interna es un método en desarrollo. En nuestro caso se puede conocer las diferentes condiciones de funcionamiento debido a que se cuenta con los equipos apropiados, como lo son el motor, la cámara termográfica, el scanner, etc. Para detectar las

diferentes fallas en tiempo real, hemos provisto nuestro sistema de control difuso en un motor que permite generar varios fallos. Angamarca y Soto (2015) mencionan que el principal factor que interviene y afecta directamente en el repartimiento del gas recirculado desde el colector de escape hacia los cilindros es el régimen de giro del motor, este aspecto es muy importante en el desarrollo de la experimentación, por lo que el régimen de giro es una variable de entrada en el sistema difuso.

Çelik y Bayir (2007) desarrollaron un sistema capaz de diagnosticar diez fallos en el motor de combustión interna usando un controlador difuso para clasificar los datos con una precisión del 90 %. Nekooei (*et al.*, 2015) propuso un sistema que calcula el consumo de combustible mediante el uso de los valores de emisiones de motores de combustión interna. Sakthivel (*et al.*, 2014) realizó un modelo de lógica difusa que se utiliza para predecir el rendimiento y las emisiones del motor. Cely (*et al.*, 2015) desarrolló un sistema de diagnóstico de fallas fundamentado en lógica borrosa para mejorar la eficiencia del proceso y así evitar paros no programados en la producción. Fundamentalmente se desea diagnosticar fallas en el motor de combustión interna mediante técnicas no intrusivas, usando un sistema difuso, con el fin de detectar fallas a bajo costo y en corto tiempo, y saber a ciencia cierta cuál es la avería para realizar el mantenimiento respectivo.

## **Materiales y métodos**

### ***Equipos de muestreo***

#### ***Motor***

El motor que se utiliza en el desarrollo de esta investigación es un CRDI 2.0 Hyundai Santa Fe con 4 cilindros en línea turboalimentado con Intercooler, cuyas características se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1  
Especificaciones generales del motor de experimentación

Número de cilindros	4
Cilindrada	1 991 cm <sup>3</sup>
Calibre	3 seg
Carrera	12%
Rc	17.7:1
Orden de encendido	1-3-4-2
Torque/rpm	421 Nm/1 800
Potencia máxima	110,54 W

Fuente: los autores

*Cámara termográfica*

Permite divisar la emisión de radiación infrarroja, mediante la captura de imágenes térmicas en tiempo real, representando en ellas la distribución térmica superficial de los cuerpos observados. Se utiliza la cámara Testo 882, cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2  
Especificaciones de la cámara Testo 882

Campo visual/distancia mínima de enfoque	Objetivo estándar: 32°x23° / 0.2 m
Sensibilidad térmica (NETD)	< 60 mk a 30 °C
Resolución geométrica	Objetivo estándar: 1.7 mrad
Frecuencia de imagen	33 Hz dentro de la UE, 9 Hz fuera de UE
Enfoque	Manual +motorizado 1.5
Tipo de detector	FPA 329 x 240 pixeles, a-Si 421 Nm/1 800
Rango espectral	8 – 14 um

Fuente: los autores

Scanner

En la obtención de datos del motor como la temperatura, el régimen de giro, etc., se utiliza el scanner de diagnóstico profesional, del cual se muestran las características en la siguiente tabla:

Tabla 3  
Especificaciones técnicas del scanner

Marca	VCI CARMAN SCAN
Conexión	USB 2.0 (ROHS), Bluetooth 2.0, LAN inalámbrica
Diagnóstico	OBD II
Temperatura de funcionamiento	10°C – 60°C
Temperatura de funcionamiento	7V – 35V

Fuente: los autores

Lugar de ejecución del experimento

La toma de muestras se realiza en la cámara anecoica de la Universidad Politécnica Salesiana, mostrada en la figura 1, con el fin de evitar ruidos que alteren las muestras obtenidas mediante la cámara termográfica Testo 882.

Figura 1  
Motor para la experimentación

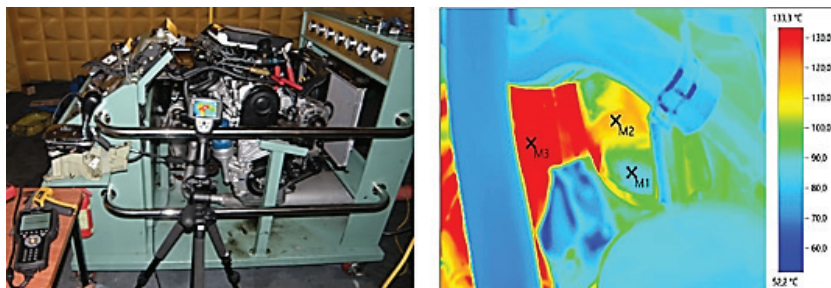


Fuente: los autores

### *Área seleccionada para la medición y obtención de datos*

Para el estudio del experimento se definen tres puntos específicos, como objetos de análisis en el área seleccionada, como se puede apreciar en la figura 2. Se establecen los tres puntos M1, M2 y M3 como muestras de análisis debido a que se observan que son zonas estables de mayor relevancia para la investigación.

Figura 2  
Espectrograma del área de estudio



Fuente: los autores

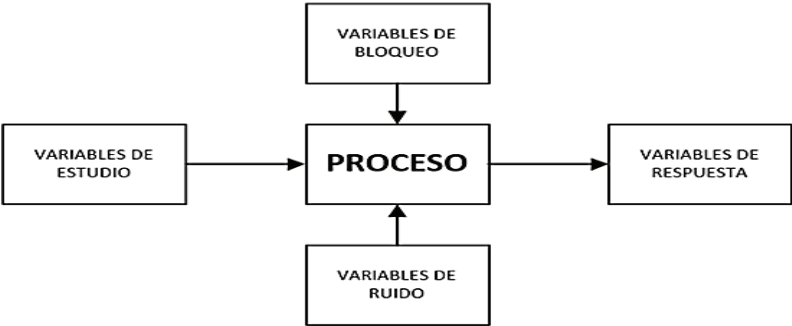
### *Diseño del experimento*

El objetivo es desarrollar un modelo que describa de manera adecuada, es decir, con precisión, el pasado, presente y futuro del diseño (Hinkelmann, 2008). A través del desarrollo del diseño experimental se obtiene la información acerca de las variables del proceso, que se presentan en la figura 3.

### *Variables de respuesta*

Es la característica del resultado se obtiene a mejorar mediante el diseño de experimento, en este caso la respuesta es la temperatura y flujo másico.

Figura 3  
Esquema del proceso de un diseño de experimento



Fuente: los autores

*Variables controlables*

Son variables que se pueden controlar, también se conocen como factores, las mismas que tienen efecto sobre la variable de respuesta que se desea estudiar.

*Factores y niveles*

Dentro de cada factor controlable pueden existir diferentes niveles, que se definen en bajo, medio y alto como la tabla 4 los presenta.

Tabla 4  
Representación de factores y niveles

Factores	Niveles			Unidades
	Bajo	Medio	Alto	
% de apertura de EGR	0	50	100	%
Régimen de giro	800	1 600	2 500	rpm
Ø Restricción de escape	0,78	9,44	18,09	cm

Fuente: los autores

*Variables de bloqueo*

Estas variables no son controlables, pero de alguna manera influyen en el desarrollo y resultados de la investigación, estos factores se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5  
Variables de bloqueo

Factores	Valor	Unidades
Temperatura del refrigerante	87 a 93	°C
Carga externa del motor	0	%
Temperatura del aire	19 a 25	°C
Humedad relativa	60 a 90	%

Fuente: los autores

Los valores reales de las variables de entrada que determinan un buen funcionamiento en el motor se muestran en la tabla 6 (800 rpm) y tabla 7 (2 500 rpm).

Tabla 6  
Valores reales de entrada

Variable	Valor normal de funcionamiento	Unidades
Temperatura	91	° C
Régimen de giro	800	rpm
Flujo másico	23,6	g/s

Fuente: los autores

Tabla 7  
Valores reales de entrada

Variable	Valor normal de funcionamiento	Unidades
Temperatura	96,4	° C
Régimen de giro	2 500	rpm
Flujo másico	104,6	g/s

Fuente: los autores

Los valores de las variables de salida, que indican el correcto funcionamiento del motor se presentan en la siguiente tabla:

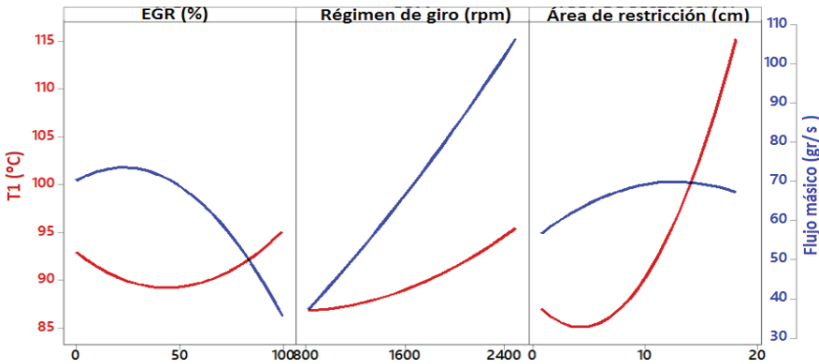
Tabla 8  
Valores reales de salida

Factor	Valor normal de funcionamiento	Unidad
Restricción del diámetro de escape	0	cm
Apertura de la válvula EGR	0	%

Fuente: los autores

Mediante el diseño experimental se puede construir la base de reglas para el sistema difuso, además, sirve para diagnosticar las fallas en tiempo real al momento de hacer funcionar el motor de combustión interna. El resultado del diseño de experimentos donde se obtiene el comportamiento de la temperatura (línea azul) y el flujo másico (línea roja) en base a las variables de EGR, rpm y Área de restricción.

Figura 4  
Comportamiento de la temperatura y flujo másico



Fuente: los autores



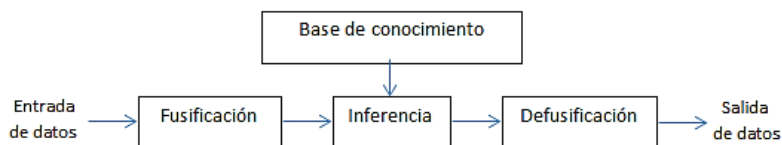
## *Lógica difusa*

La base de la lógica difusa se desarrolla por medio del conocimiento de un experto que se codifica en forma de reglas y se utiliza en la toma de decisiones (MathWorks, 2015). Las reglas describen en las palabras, las relaciones entre las variables de entrada y salida sobre la base de sus términos lingüísticos (National Instruments, 2017).

## *Clasificador difuso*

La clasificación inteligente se realiza con la ayuda de la lógica difusa que se usa como una herramienta, la misma que permite el desarrollo de la conducta basada en reglas. La principal ventaja de la lógica difusa es que se puede ajustar y adaptar, si es necesario, aumentando el grado de libertad de control en el sistema difuso. Para llevar a cabo la inferencia borrosa para resolver un problema real, se necesitan tres pasos consecutivos: difusificación, inferencia difusa y desdifusificación (Bai y Wang, 2006), en la figura 5 se ilustra un esquema de un sistema difuso.

Figura 5  
Esquema del sistema difuso

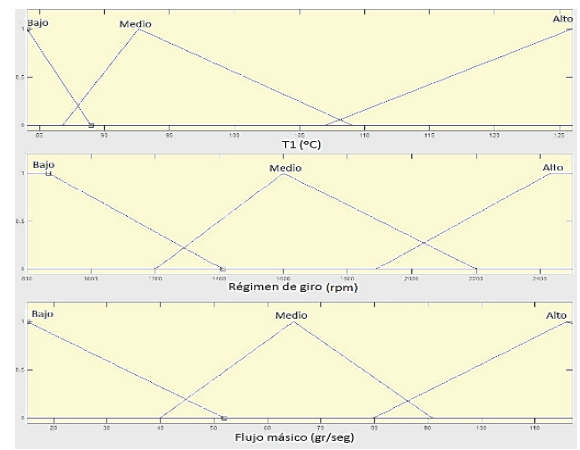


Fuente: los autores

## *Difusificación*

El primer paso es tomar las entradas y determinar el grado de pertenencia de cada uno de los conjuntos difusos correspondientes a través de las funciones de pertenencia. Se escoge una función de pertenencia apropiada para las entradas y salidas (función de membresía). Luego se elige diferentes etiquetas para cada conjunto difuso, que para este caso son bajo, medio y alto. En la figura 6 se muestra las variables de entrada.

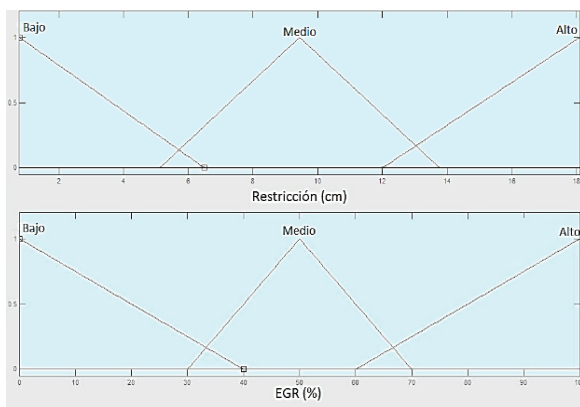
Figura 6  
Funciones de membresía para las variables de entrada



Fuente: los autores

Las funciones de membresía de las variables de salida se observan en la siguiente figura:

Figura 7  
Funciones de membresía para las variables de salida



Fuente: los autores

*Inferencia difusa*

En esta parte se utiliza la experiencia para conocer el funcionamiento a diferentes parámetros y en base a esto crear reglas que rigen en el sistema, que se ilustran en la siguiente tabla:

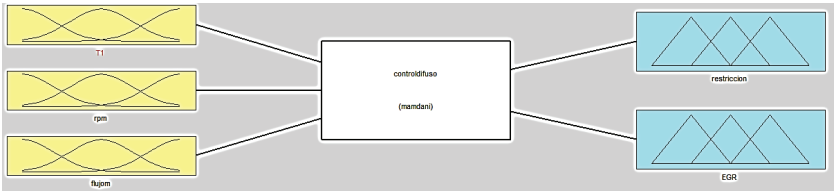
Tabla 9  
Definición de la base de reglas

	T1	rpm	Flujo másico	Restricción	EGR
1	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio
2	Medio	Medio	Bajo	Medio	Alto
3	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
4	Alto	Bajo	Medio	Alto	Medio
5	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto

Fuente: los autores

La relación entre las variables de entrada y salida se presentan en la siguiente figura:

Figura 8  
Inferencia difusa

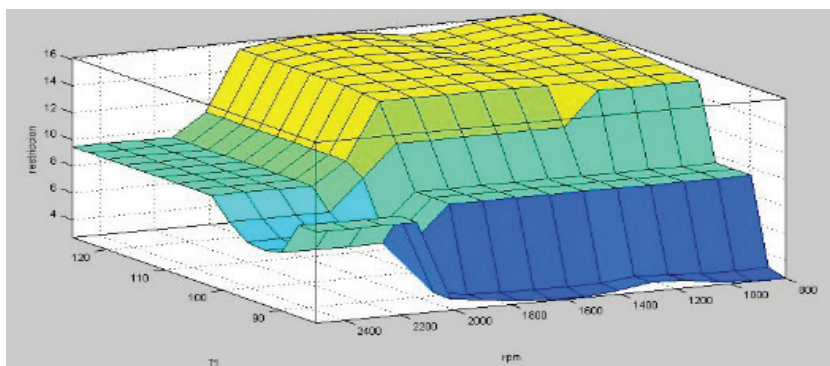


Fuente: los autores

*Desdifusificación*

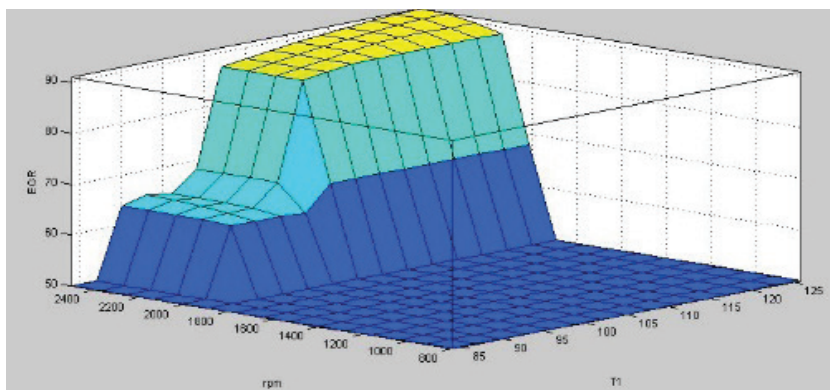
Adecúa los valores difusos en valores reales. Las superficies de respuesta para las diferentes salidas se observan en la figura 9 en el caso de la restricción y en la figura 10 para la EGR.

Figura 9  
Superficie de respuesta de la restricción



Fuente: los autores

Figura 10  
Superficie de respuesta para la EGR



Fuente: los autores

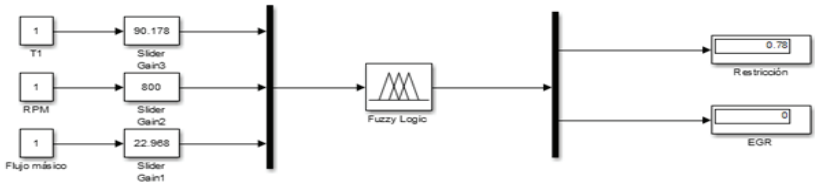
## Resultados y discusión

Una vez obtenidas las reglas para el sistema difuso y cada una de las funciones de membresía de las variables de entrada y salida, se reali-

zan las pruebas variando cada una de las entradas como son T1, rpm y flujo másico, para comprobar el desempeño del sistema difuso.

La simulación del sistema difuso se realiza en la plataforma Simulink debido a las facilidades que presenta en la programación y la velocidad de respuesta para la obtención de datos. La programación en la plataforma Simulink se la realiza colocando las tres entradas: T1, rpm y flujo másico; posteriormente se ubica el sistema difuso el mismo que cuenta con las reglas cargadas y por último se colocan las dos salidas restricción y EGR que se muestra en la figura:

Figura 11  
Programación en la plataforma Simulink



Fuente: los autores

Los resultados del estudio se presentan en la tabla 10 obteniendo como resultado los datos de la simulación realizada en la plataforma Simulink.

Tabla 10  
Datos obtenidos en la plataforma Simulink

	T1	rpm	Flujo másico	Restricción	EGR
1	90,18	800	22,97	0,78	0
2	95,46	2 500	105,23	0,78	0
3	84,9	800	35,22	9,44	50
4	89,98	1 600	39,30	9,44	86,95
5	91,38	1 600	64,9	9,44	50
6	102,76	800	41,42	15,18	44,12
7	106,09	1 400	39,30	15,24	86,95

Fuente: los autores

En cambios, en la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en el MEC.

Tabla 11  
Datos obtenidos de las pruebas del MEC

	T1	rpm	Flujo másico	Restricción	EGR
1	90,08	800	23,67	0,78	0
2	96,47	2 500	104,62	0,78	0
3	86,76	800	37,05	9,44	50
4	92,35	1 600	42,08	9,44	86,95
5	88,97	1 600	67,39	9,44	50
6	100,40	800	38,73	15,18	44,12
7	106,57	1 400	40,23	15,24	86,95

Fuente: los autores

El porcentaje de error obtenido a partir de los datos tomados en el motor de combustión interna en comparación con los datos obtenidos en la simulación del sistema difuso realizado en la plataforma Simu-link se los presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12  
Error obtenido de la comparación entre los datos del MEC y la simulación del sistema difuso

	T1	Flujo másico
1	0,11%	2,95%
2	1,04%	0,58%
3	2,14%	4,93%
4	2,56%	6,61%
5	2,70%	3,69%
6	2,35%	6,94%
7	0,45%	2,31%

Fuente: los autores

Estos resultados de la simulación demuestran el buen funcionamiento y estabilidad del motor con el sistema de control difuso propuesto.

## Conclusiones

El sistema propuesto tiene un error máximo del 7% que se da en la máxima obstrucción del escape y apertura de la EGR.

El sistema no genera error cuando no existe restricción en el escape y apertura en la válvula EGR.

El sistema generado es muy fiable para diagnosticar la obstrucción en el escape y la apertura de la EGR, con lo que se consigue detectar este tipo de fallas sin necesidad de detener o desarmar el motor, lo que genera ahorro de tiempo y dinero.

## Referencias bibliográficas

- Angamarca, J. A. y Soto, C. R. (2015). *Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai Santa Fé 2.0, mediante el análisis de vibraciones*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Bai, Y. y Wang, D. (2006). Fundamentals of Fuzzy Logic Control. Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. En Y. Bai y D. Wang (eds.), *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications* (pp. 17-36). Londres: Springer.
- Çelik, B. y Bayir, R. (2007). Fault detection in internal combustion engines using fuzzy logic. *Journal of Automobile Engineering: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D*, 579-587.
- Cely, M. H., Estupiñán, A. S. y Rivera, F. V. (2015). Sistema difuso para la detección y diagnóstico de falla en la generación a vapor. *Scientia et Technica*, 4-9.
- Hinkelmann, K. (2008). Introduction to Experimental Design. En K. H. Kempthorne, *Design and Analysis of Experiments* (pp. 1-41). John Wiley & Sons, Inc.

- Mantilla, C. A. y Tapia, J. C. (2015). *Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDI, mediante el uso de termografía infrarroja*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- MathWorks, T. (2015). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. MathWorks, Inc.
- National Instruments. (julio, 2017). USB-6008. Recuperado de sine.ni.com: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>
- Nekooei, M. J., Jaswar y Priyanto, A. (2015). A Simple Fuzzy Logic Diagnosis System for Control of Internal Combustion Engines. *Jurnal Teknologi*, 121-124.
- Sakthivel, G., Snehitkumar, B. e Ilangkumaran, M. (2014). Application of fuzzy logic in internal combustion engines to predict the engine performance. *International Journal of Ambient Energy*, 2-11.





# Detección de fallas en un motor de combustión interna Hyundai Sonata 2.0 EF mediante análisis de componentes independientes

Néstor D. Rivera Campoverde<sup>1</sup>

Danilo A. Gárate Montalvo<sup>2</sup>

Juan F. Chica Ortiz<sup>3</sup>

## Resumen

En la presente investigación se prueba el método de análisis de componentes independientes para ser utilizado en el diagnóstico de fallas de motores de combustión interna. Para esto se realizan varios experimentos de muestreo, procesamiento de señal y análisis estadístico de los resultados mediante software computarizado.

## Palabras clave

Diagnóstico de fallas, motores de combustión interna, software, procesamiento de la señal.

## Abstract

*In this paper the method of analysis of independent components to be used in software for fault diagnosis of internal combustion engines is tested. For this, several experiments are performed on sampling, signal processing and statistical analysis of results using computerized software.*

## Keywords

*Fault diagnosis, internal combustion engines, software, signal processing.*

- 
- 1 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (nrivera@ups.edu.ec).
  - 2 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (dgarate@est.ups.edu.ec).
  - 3 Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (jchicao@ups.edu.ec).

## Introducción

El análisis de componentes independientes ha sido muy útil para muchas aplicaciones en diferentes campos (López, 2012). Logra mediante el análisis de componentes independientes clasificar las señales acústicas que generan molestias a la población de la ciudad de México. Para esto se tomaron varias fuentes producidas por actividades sociales, comerciales y de transporte terrestre, una vez tomadas las señales se realizó un procesamiento de señales para aproximar las fuentes reales del ruido y de esta manera identificar los factores que molestan a la sociedad.

En Delvecchio (*et al.*, 2017) se trata sobre las estrategias y técnicas de vanguardia basadas en señales vibro acústicas que pueden monitorear y diagnosticar fallos en motores de combustión interna, tanto en el banco de pruebas como en las condiciones de operación del vehículo. Se describen diferentes condiciones defectuosas que afectan la combustión, la mecánica y la aerodinámica de los MCI. Se debe tener en cuenta las recientes necesidades de la industria para optimizar la durabilidad estructural de los componentes adoptando ciclos de larga duración, verificar el estado final del motor al final de la línea de montaje y reducir los costes de mantenimiento de la vida de MCI durante las operaciones del vehículo.

Muñoz (*et al.*, 2008) muestra cómo se puede remover ruido de una señal electrocardiográfica utilizando métodos de análisis multivariado como el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis de componentes independientes (ICA), aplicados sobre una base de datos de electrocardiograma tomados en humanos, obteniendo mejores resultados con un algoritmo de FastICA usando el criterio de negentropía.

El avance tecnológico en el campo automotriz ha evolucionado bastante en los últimos años, se podría decir que en la actualidad se cuentan con todos los equipos necesarios para realizar un correcto diagnóstico de una falla, sin embargo, estos equipos como osciloscopios, escáner, compresómetro, etc. no están al alcance de la población en general, sin contar con los gastos y sobre todo la experiencia que conllevan aprender a diagnosticar las fallas en el motor de combustión interna.

El objetivo de la presente investigación es ofrecer una alternativa de diagnóstico de fallas de un motor de combustión interna. Para realizar el programa de diagnóstico previsto, es necesario analizar la señal tomada del motor, dicha señal debe entrar como una señal de audio, sin embargo, una señal de audio tomada del motor tendrá varias fuentes de audio como: la vibración de las bases del motor, la combustión dentro de los cilindros, el golpe de placas metálicas, ruidos del exterior, etc. dichas fuentes de audio producen vibraciones indeseadas para el análisis de la señal, por lo que para obtener una gran precisión se necesitará del análisis de componentes independientes (ICA), de manera que se pueda ofrecer un resultado claro y sencillo al público en general, sin necesidad de utilizar equipos de diagnóstico costosos y sin necesidad de adquirir experiencia previa.

## **Recursos e instrumentos**

### *Motor de combustión interna*

Para obtener resultados más cercanos a la realidad se ha utilizado un motor de combustión interna montado sobre el vehículo de manera que sea posible diferenciar las características de los diferentes ruidos de las características propias del motor. El motor utilizado en la investigación se presenta en la figura 1 y sus características técnicas se detallan en la tabla 1.

### *Aplicación y software*

La herramienta utilizada para la grabación de audio es Voice Record Pro, dicha herramienta es una grabadora de voz profesional, tiene disponible funciones avanzadas como grabar, compartir, cargar y editar. Por defecto, la aplicación puede grabar voz en formato .aac y.m4a. Con la función de conversión, puede convertir los archivos en formatos .wma.mp3 y.wav para utilizarlos en otros dispositivos. Esta aplicación permite configurar adecuadamente la grabadora de voz, de manera que se puede obtener muestras muy claras para el respectivo análisis

Figura 1  
Motor DOHC 16V utilizado en la investigación



Fuente: los autores

Tabla 1  
Características técnicas del motor utilizado en la investigación

Características técnicas del motor	
Número de cilindros	4
Cilindrada	2 000
Tren de válvulas	DOHC
Relación de compresión	10.5:1
Potencia/rpm	175/6 000
Par/rpm	168/4 000
Combustible	Gasolina
Transmisión	Automática

Fuente: los autores

El software Matlab es utilizado para leer las muestras de sonido, analizar mediante componentes independientes cada muestra, realizar la Transformada de Fourier correspondiente a cada mezcla original y su respectivo componente y obtener datos estadísticos como la media, la varianza, la desviación estándar, la mediana, etc. Este software es utilizado en la investigación por sus favorables funciones para el análisis de muestras de audio, permitiendo obtener sus graficas temporales, espectrales y crear el algoritmo respectivo para el análisis de componentes independientes. Minitab es utilizado para confirmar estadísticamente la diferencia obtenida en el análisis de componentes independientes y el análisis de las fuentes originales de muestreo.

## Métodos

Para comenzar con la experimentación se toman varias muestras de sonido del motor. Se utiliza el scanner automotriz Carman Scan Vg para comprobar que el motor se encuentre en correcto funcionamiento y se debe cuidar que el ambiente en el que se toman las muestras sea el adecuado para que las muestras no contengan más ruido que el del propio vehículo. También se debe provocar una falla, en este caso se cortó el paso de combustible a uno de los inyectores del motor.

Se procede a tomar las muestras y para esto se considera realizar varias corridas y también la toma las muestras de manera aleatoria, es decir, se obtienen muestras en buen funcionamiento y con falla provocada sin un orden específico, de forma aleatoria, de esta manera se garantiza que los datos obtenidos serán favorables para el análisis estadístico. Cada muestra debe durar alrededor de 5 segundos y se debe contar con 4 fuentes para cada experimento.

Una vez obtenidas las muestras del motor en buen funcionamiento y con falla provocada se procede a realizar el procesamiento de las señales en donde se toma la lectura de las 4 fuentes, se realiza el análisis de componentes independientes y también se obtiene la transformada de

Fourier de cada una de las señales y de cada componente independiente obtenido para el análisis estadístico.

Figura 2  
Toma de muestras



Fuente: los autores

Al terminar el análisis de las fuentes y componentes independientes con el motor en buen funcionamiento y con falla provocada, el cual incluye el análisis de media, varianza, desviación estándar, mediana, máximo, mínimo, potencia, energía, curtosis, asimetría y la raíz media cuadrática (Rms); se procede a exportar los datos para analizarlos estadísticamente en Minitab.

El objetivo de analizar los datos estadísticamente es encontrar la independencia de los datos y de esta manera comprobar que el análisis de componentes independientes es útil para diferenciar entre los ruidos innecesarios del motor y los sonidos correspondientes a la explosión de los cilindros, a la apertura y cierre de válvulas, etc.; de esta manera se podrán clasificar los ruidos del motor y compararlos entre un motor con buen funcionamiento y uno en mal funcionamiento.

### *Separación ciega de fuentes (BSS)*

La separación ciega de fuentes (BSS) es el proceso de separación de las señales fuente de las señales observadas a través de las propiedades estadísticas de las señales fuente. Se dice que la separación es ciega porque las señales fuente no pueden ser observadas y porque la manera de mezclar las señales fuente es desconocida. Para abordar los diferentes estilos de mezcla de las señales de origen, el problema del BSS puede clasificarse como un modelo de mezcla lineal instantáneo, un modelo de convolución lineal o un modelo de mezcla no lineal (Yu, 2013).

### *Análisis de componentes independientes (ICA)*

El análisis de componentes independientes es un método de la separación ciega que encuentra estadísticamente factores independientes y no Gaussianos o componentes de datos variantes. El objetivo de este método es una señal Gaussiana.

ICA tiene un razonamiento en el denominado *cocktail party*, el cual demuestra que en una reunión donde estén hablando varias personas a la vez



o haya ruido, nuestro cerebro es capaz de seleccionar una o varias de entre las voces de las personas que están hablando y escuchar lo que están diciendo.

En general, las señales mezcladas se observan a través de unos sensores, los cuales obtienen una información mezclada ( $e_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, p$ ) y que no coincide con la original, el problema consiste en, a partir de las observaciones ( $e_k(t)$ ), encontrar las señales independientes ( $s_i(t)$ ), bajo las siguientes condiciones:

- Las fuentes ( $s_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ ) son desconocidas y estadísticamente independientes.
- El número de sensores ( $p$ ) es igual al número de fuentes.
- Se modela la influencia del medio material de manera lineal mediante una matriz de mezcla  $A$  (Górriz *et al.*, 2009).

Bajo estas condiciones se obtiene la denominación de separación ciega de fuentes puesto que no hay información alguna sobre ellas.

El análisis de componentes principales (PCA) es un método clásico de análisis de datos que tiene sus principales aplicaciones en el campo de la extracción de características y compresión de datos (Núñez, 2005). A diferencia del análisis de componentes principales (PCA), ICA no supone que las componentes del método sean ortogonales para su separación, por lo que es importante únicamente la independencia estadística de los componentes (Sandoval, 2014).

El objetivo fundamental del análisis de componentes independientes es el de proporcionar un método que permita que las componentes de entrada sean estadísticamente independientes o lo más independiente posible. Una representación de este tipo permite obtener la estructura fundamental de los datos en muchas aplicaciones, incluidas la extracción de características y la separación de señales (Núñez, 2005).

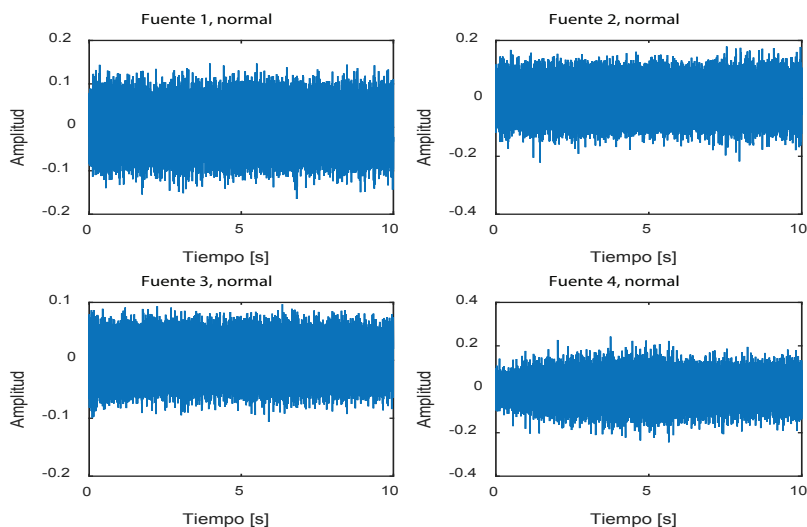
Aunque el método no garantiza la recuperación exacta de las señales originales, la única diferencia entre las señales originales y las componentes recuperadas es un factor de escala. En términos de análisis espec-

tral, el ruido generado por un vehículo a motor puede ser caracterizado mediante su densidad espectral de energía. Un análisis en frecuencia de su distribución energética revela la existencia de una combinación de procesos estocásticos de banda ancha, causados principalmente por las turbulencias generadas en el motor, con procesos determinísticos de mayor importancia, caracterizados espectralmente mediante componentes armónicas de ruido generado en el proceso de combustión.

## Resultados y discusión

El algoritmo utilizado nos permite observar características temporales y frecuenciales de las fuentes y componentes obtenidos. En la figura 3 se muestra las gráficas de las fuentes originales del motor en buen funcionamiento.

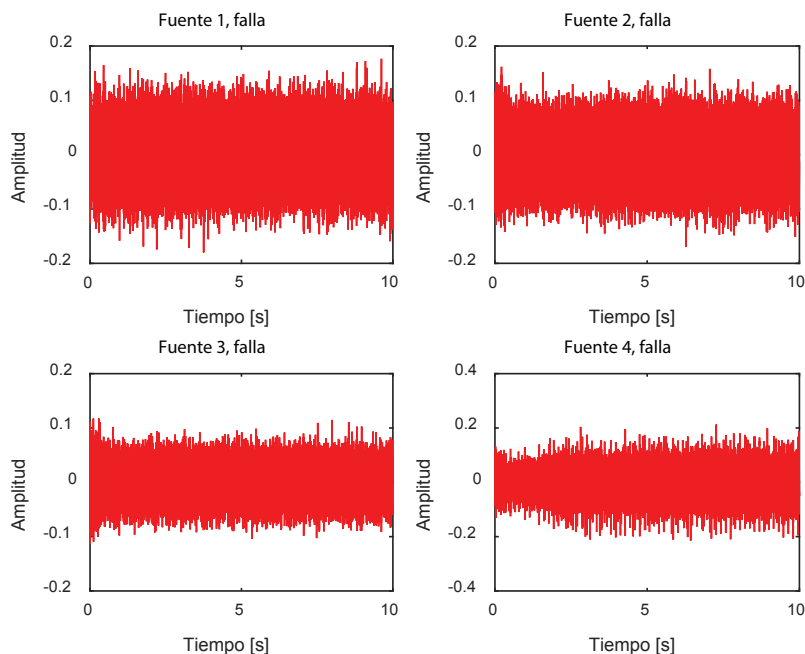
Figura 3  
Gráficas temporales del motor en buen funcionamiento



Fuente: los autores

En la figura 4 se muestra las gráficas de las fuentes originales del motor con una falla provocada.

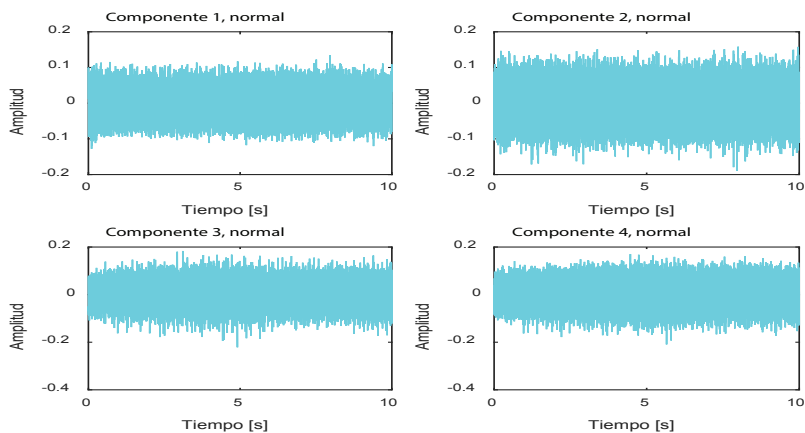
Figura 4  
Gráficas temporales del motor con falla provocada



Fuente: los autores

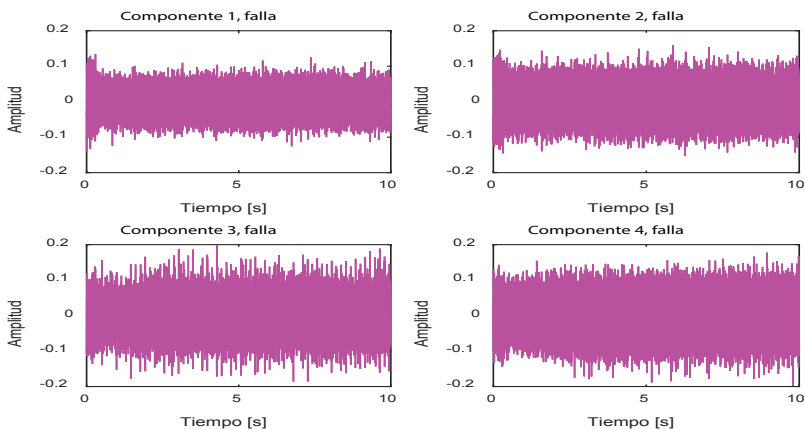
Una vez aplicado el método de análisis de componentes independientes a las muestras de buen funcionamiento y con falla provocada se obtienen los componentes independientes mostrados en las figuras 5 y 6.

Figura 5  
Componentes independientes obtenidos  
del motor en buen funcionamiento



Fuente: los autores

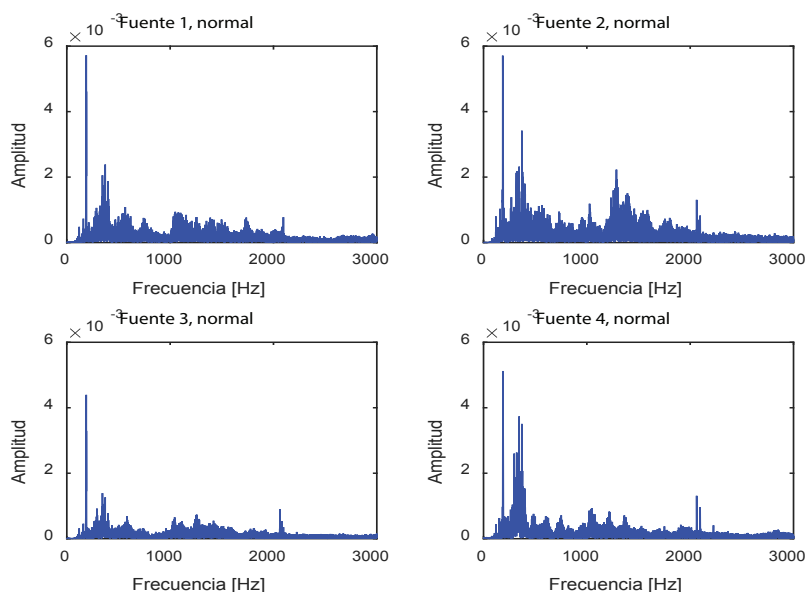
Figura 6  
Componentes independientes obtenidos del motor con falla provocada



Fuente: los autores

También se realiza la Transformada de Fourier a las fuentes y a los componentes para el análisis. En la figura 7 se muestra la transformada de Fourier de las fuentes del motor en buen funcionamiento.

Figura 7  
Transformadas de Fourier de las fuentes del motor  
en buen funcionamiento



Fuente: los autores

En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos del análisis temporal y en la tabla 3 se muestra los resultados obtenidos del análisis frecuencial, en Minitab. Los valores representados por X dan a conocer que existe una independencia estadística muy notable de los datos mientras que los representados por C son aquellos en los que, si bien existe independencia estadística, no es muy notable, y los casilleros de color gris representan que no existe independencia estadística de los datos.

Tabla 2  
Independencia estadística de las características en el análisis temporal

Análisis temporal						
Condición	Fuente normal vs. fuente con falla	Fuente normal vs. componentes con falla	Fuente normal vs. componentes normales	Fuente con falla vs. componentes con normales	Fuente con falla vs. componentes con falla	Componentes normales vs. componentes con falla
Media						
Varianza	X	X	C	X	C	
Desviación estándar	X	X	X	C	C	
Mediana	X			X	X	
Máximo	X	X	C	C	X	
Mínimo	X	X	C	C	C	
Potencia	X	X	C	C	X	
Energía	X	X	C	C	X	
Curtosis	X	C	C	X	X	X
Asimetría	X	C	C	C	X	X
Rms	X	X	X	X	X	

Fuente: los autores

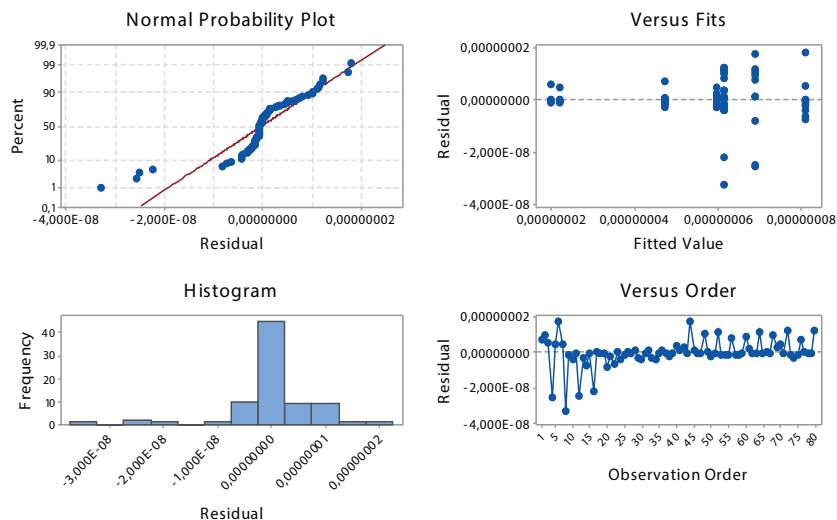
Tabla 3  
Independencia estadística de las características en el análisis frecuencial

Análisis frecuencial						
Condición	Fuente normal vs. fuente con falla	Fuente normal vs. componentes con falla	Fuente normal vs. componentes normales	Fuente con falla vs. componentes con normales	Fuente con falla vs. componentes con falla	Componentes normales vs. componentes con falla
Media	X	X	C	X	X	
Varianza	X	X	X	X	X	
Desviación estándar	X	X	X	X	X	
Mediana	X	X	X	X	X	
Máximo	X	X		C		C
Mínimo	C			C	C	
Potencia	X	X	X	X	X	
Energía	X	C		X	X	
Curtosis	C	C		C		C
Asimetría	C	C		C	C	C
Rms	X	X	X	X	X	

Fuente: los autores

De los resultados presentados en la tabla 2, cabe destacar las gráficas de las fuentes con el motor en correcto funcionamiento frente a las fuentes con el motor con falla provocada. En la figura 8 se muestran las gráficas de independencia estadística de la energía como condición. Aquí podemos observar que, tomando como referencia la energía los datos obtenidos de las fuentes en correcto funcionamiento, son estadísticamente independientes de las fuentes tomadas con el motor con falla provocada.

Figura 8  
Gráficos residuales para la energía

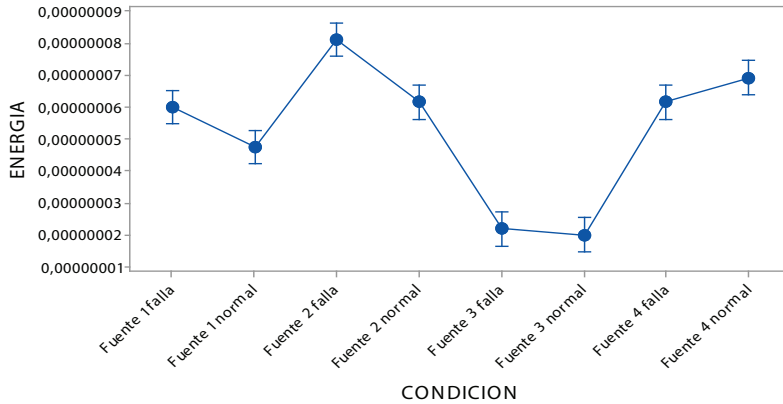


Fuente: los autores

En la figura 9 se muestra la gráfica de Tukey, en donde se comprueba la independencia estadística de los datos.

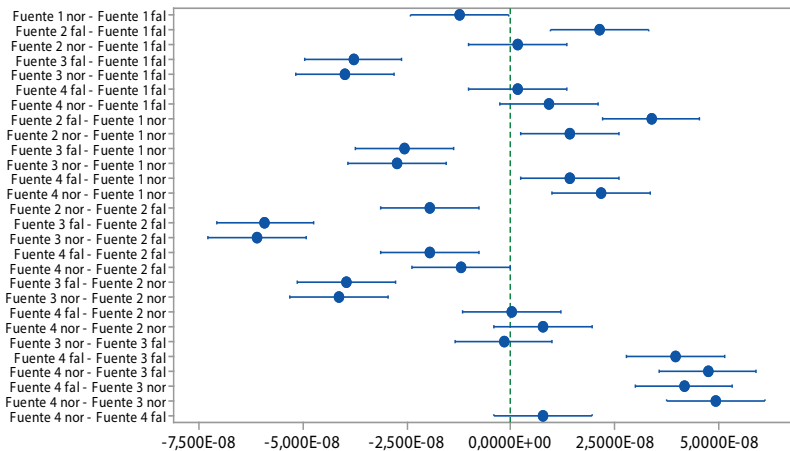


**Figura 9**  
Gráfica de intervalos de Medias vs. Energía  
con un 95% de índice de confianza



Fuente: los autores

**Figura 10**  
Gráfica de Tukey de las diferencias de Medias vs. Energía



Fuente: los autores

## Conclusiones

Se han obtenido los componentes independientes de las cuatro fuentes exitosamente mediante el algoritmo. Sin embargo, al analizar los valores temporales en la tabla 2, los resultados de la comparación estadística de la fuente con el motor en buen funcionamiento frente a los componentes en mal funcionamiento y la comparación estadística de la fuente con el motor con falla provocada frente a los componentes de buen funcionamiento, aunque existe diferencia estadística no se puede concluir que obtener los componentes independientes de la muestra nos de valores estadísticos diferentes a los de las fuentes.

De igual manera, al analizar los valores frecuenciales en la tabla 3, la comparación de la fuente con el motor en buen funcionamiento frente al motor con falla provocada nos da independencia estadística en todas las características, por lo que no se puede encontrar una ganancia significativa al analizar mediante componentes independientes.

No se puede encontrar una ventaja al analizar las fallas mediante componentes independientes, ya sea al analizar los datos temporales o los frecuenciales, por lo que se recomienda utilizar mayor número de fuentes, debido a que en la investigación se utilizó cuatro fuentes. Sin embargo, los ruidos provocados como: la explosión dentro del cilindro, la apertura y cierre de las válvulas, el pulso de inyección y por los diferentes componentes del motor, exigen mayor número de instrumentos de medición; de esta manera se puede obtener mayores componentes y de esta manera encontrar mayores independencias estadísticas.

Aunque se logró sincronizar con bastante exactitud los instrumentos de medición, también se recomienda utilizar un método de medición más preciso, como una tarjeta de adquisición de datos DAQ y sensores como fuentes de medición, de esta manera se puede obtener datos con mayor claridad y sobre todo obtener una mejor sincronización al momento de tomar los datos.

## Referencias bibliográficas

- Delvecchio, S., Bonfiglio, P. y Pompoli, F. (2017). *Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines: A critical review of existing techniques. Mechanical Systems and Signal Processing*. Ferrara, Università degli Studi di Ferrara.
- Górriz, J., Puntonet, C., Salmerón, M. y Cazalla, M. (2009). *Implementación en MATLAB de los algoritmos de separación de señales (ICA) basados en análisis de componentes independientes: ICAToolBOS 2.0*. Cádiz: Universidad de Cádiz.
- López, M. (2012). *Clasificador difuso de señales acústicas ambientales basado en el análisis de componentes independientes*. México D.F.: CONACYT.
- Muñoz, J., Rivera, J. y Duque, E. (2008). *Análisis de componentes principales e independientes aplicados a reducción de ruido en señales electrocardiográficas*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Núñez, J. (2005). *Estudio de nuevos algoritmos de observaciones en componentes*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Sandoval, J. (2014). *Análisis de componentes independientes aplicado al estudio de la actividad cerebral*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Yu, X. (2013). *Blind Source Separation: Theory and Applications*. Wiley: Beijing Normal University.

# Influencia de la viscosidad del lubricante como sellante de holguras en las válvulas de un motor de combustión interna mediante análisis de vibraciones y emisiones contaminantes

---

Milton García<sup>1</sup>

Adrián Siguenza<sup>2</sup>

Pablo Maxi<sup>3</sup>

Luis Mendoza<sup>4</sup>

## Resumen

La presente investigación se realizó con el fin de cubrir la hipótesis descrita por varios mecánicos automotrices: "al incrementar la viscosidad del lubricante sellamos holguras y disminuimos las emisiones contaminantes", partiendo de un diseño experimental el cual indica el orden para la toma de muestras, siendo los factores de entrada: la holgura entre vástago y guía de válvula, grado de viscosidad del lubricante y aditivo, obteniendo como factores de salida: señales vibratorias y emisiones de gases contaminantes para su análisis. Para la obtención de señales vibratorias y emisiones contaminantes se utilizó un escáner automotriz Multiscan, un analizador de señales acústicas Adash, un acelerómetro y un analizador de gases QGA-6000 de la marca Grotech. Posteriormente, para el procesamiento de señales vibratorias se transformó la señal vibratoria del dominio del tiempo al dominio de frecuencia

- 
- 1 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte de la Universidad Politécnica Silesiana.
  - 2 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte de la Universidad Politécnica Silesiana.
  - 3 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte de la Universidad Politécnica Silesiana.
  - 4 Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte de la Universidad Politécnica Silesiana.

mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Finalmente, se procedió al análisis, mediante el análisis de superficie de respuesta, análisis de gráficas factoriales, un estudio de los armónicos y características temporales presentes en los espectros.

### Palabras clave

Aditivo, contaminantes, holgura, lubricante, vibración, viscosidad.

### Abstract

*The present investigation was done to cover the hypothesis described by several automotive mechanics "by increasing the viscosity of the lubricant we sealed clearances and reduced the pollutant emissions". It was implemented an experimental design for the purpose of know the order sampling, based on different configurations of the input factors such as: clearance between rod and valve guide, degree of lubricant viscosity and additive for change lubricant viscosity, for analysis we have as output factors: vibratory signals and emissions of pollutant gases. For obtaining vibratory signals and emissions of pollutant gases we use an automotive scanner Multiscan, acoustic signal analyzer Adash, uniaxial accelerometer and a gas analyzer QGA-6000 brand Qrotech. Then, for processing of vibratory signals we use fast Fourier transform (FFT) to change the vibration signal from the time domain to the frequency domain, finally, proceeded with a surface analysis, analysis of factorial graphs, by last, a study of the harmonics and temporary characteristics present in the spectra.*

### Keywords

Additive, contaminants, clearance, lubricant, vibration, viscosity.

## Introducción

La presente investigación se ha centrado en el desgaste prematuro de las válvulas del primer cilindro con la alteración de viscosidad en lubricantes a las prescritas por el fabricante y la introducción de un aditivo. Esta indagación se ha fundamentado en la hipótesis planteada por varios mecánicos automotrices: "al incrementar la viscosidad del lubricante sellamos holguras y disminuimos las emisiones contaminantes". Para corroborar esta hipótesis se indujo desgaste en las válvulas del primer cilindro y se modificaron las viscosidades con la ayuda de un aditivo para producir un sellado en el desgaste producido, porque una de las fallas más frecuentes en los MCIA es el desgaste de las válvulas en sus superficies de contacto (MORESA, 2014). La vida útil de las válvulas es proporcional a los demás componentes del motor, funcionando en condiciones normales contribuyen para que las válvulas tengan desgaste normal (MAHLE, 2012).

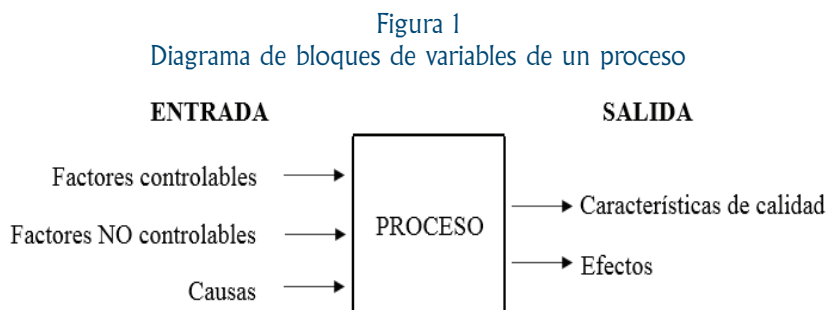
Existen varias técnicas para aplicar un mantenimiento predictivo con el fin de monitorizar elementos como son termografía, análisis

de aceites, vibraciones, entre otros. Para el presente estudio se aplica el análisis de vibraciones como técnica no invasiva para la detección de fallos y anomalías en una maquinaria en constante funcionamiento como lo expone White: “El análisis de vibraciones, cuando está aplicado correctamente, permite al técnico detectar pequeños defectos mecánicos incipientes mucho antes que representen una amenaza en contra de la integridad de la máquina” (2010). Así como también el uso paralelo del análisis de gases contaminantes para analizar el comportamiento y variación de los mismos durante las diferentes fases de la investigación.

## Materiales y métodos

### *Implementación del diseño experimental*

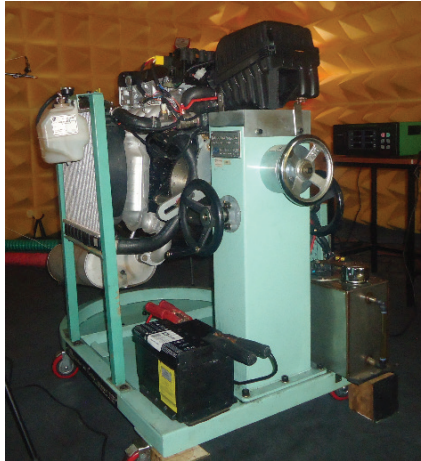
1. Modelo experimental para la adquisición de datos de señales vibratorias y emisión de gases de escape. Para la obtención de las señales se ha empleado el modelo Box-Behnken, cuyo diagrama de bloques de las variables del proceso a realizar se encuentran esquematizadas en la siguiente figura:



Fuente: los autores

2. Unidad experimental. La investigación se desarrolló sobre un motor de combustión interna (figura 2), cuyas características y especificaciones técnicas se detallan en la tabla 1.

Figura 2  
Motor Hyundai Accent



Fuente: los autores

Tabla 1  
Datos del motor Hyundai Accent

Hyundai Accent	
Motor	Alpha II
Modelo	G4FK
Cilindrada	1.5 L
Potencia máxima	74 kW @ 600 rpm
Par máximo	134 Nm @ 400 rpm
Relación de compresión	9.5:1
Distribución	DOHC

Fuente: Hyundai, s.f.

3. Factores de estudio. En este experimento se utilizan como variables de entrada: el juego entre guía y válvulas de un cilindro producto del desgaste, el grado de viscosidad del aceite y el aditivo para modificar la viscosidad del aceite. En la tabla 2 se indican los valores que se tienen como variables de entrada para este experimento.

Tabla 2  
Variables de entrada

Factor	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Holgura de válvula (guía-vástago)	0,00	0,10	0,20
Grado de viscosidad	15,6	33,645	51,69
Aditivo	0,00	0,50	1

Fuente: los autores

El desgaste se provocó en las válvulas de admisión y escape de un cilindro en la misma proporción para poder percibirlo de una forma global. Este diseño consta de 15 corridas base con tres repeticiones, teniendo un total de 45 corridas, tal y como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3  
Corridas experimentales

Orden	Visco-sidad	Hol-gura	Aditivo	Orden	Visco-sidad	Hol-gura	Aditivo	Orden	Visco-sidad	Hol-gura	Aditivo
1	15,6	0	50	16	15,6	0	50	31	15,6	0	50
2	51,69	0	50	17	51,69	0	50	32	51,69	0	50
3	15,6	20	50	18	15,6	20	50	33	15,6	20	50
4	51,69	20	50	19	51,69	20	50	34	51,69	20	50
5	15,6	10	0	20	15,6	10	0	35	15,6	10	0
6	51,69	10	0	21	51,69	10	0	36	51,69	10	0
7	15,6	10	100	22	15,6	10	100	37	15,6	10	100
8	51,69	10	100	23	51,69	10	100	38	51,69	10	100
9	33,645	0	0	24	33,645	0	0	39	33,645	0	0
10	33,645	20	0	25	33,645	20	0	40	33,645	20	0
11	33,645	0	100	26	33,645	0	100	41	33,645	0	100
12	33,645	20	100	27	33,645	20	100	42	33,645	20	100
13	33,645	10	50	28	33,645	10	50	43	33,645	10	50
14	33,645	10	50	29	33,645	10	50	44	33,645	10	50
15	33,645	10	50	30	33,645	10	50	45	33,645	10	50

Fuente: los autores



4. Factores controlables. Para este experimento se establecieron los factores presentados en la siguiente tabla:

Tabla 4  
Variables de entrada

Factor controlable	Rango
rpm	1 560
Temperatura del refrigerante	83,2 - 84,8° C
Temperatura de ingreso del aire	41,3 - 45° C

Fuente: los autores

5. Factores no controlables. En este experimento se consideró que la humedad relativa, la temperatura ambiente y la carga del motor, presentan condiciones similares al momento de realizar las corridas experimentales.

6. Variables de respuesta. Para este experimento se establece como variables de respuesta: la señal de vibración y emisión de gases contaminantes.

### *Adquisición de señales vibratorias y emisión de gases de escape*

Para la adquisición de señales vibratorias para el presente proyecto se utilizaron los siguientes elementos de medición:

1. Analizador de señales acústicas ADASH A3716. Software que permite la entrada analógica de sensores, así como también la visualización de las señales (figura 3).

2. Acelerómetro uniaxial. Es el elemento capaz de convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica, con el fin de proporcionar una salida utilizable de una magnitud que se desea medir (PICKUPS, s.f.). La norma ISO 10816-6:1995 sugiere que el acelerómetro debe ir ubicado lo más cerca posible y perpendicular al objeto y/o elemento a estudiar (ISO, 1995). Para el presente estudio el acelerómetro se ubicó en una

platina de hierro cerca al primer cilindro, en el cabezote, como se puede apreciar en la figura 4.

Figura 3  
Adash A3716



Fuente: los autores

Figura 4  
Posición del acelerómetro uniaxial



Fuente: los autores

3. Escáner automotriz. Se utilizó un escáner automotriz Multiscan para poder controlar diferentes parámetros de funcionamiento del motor (IAT, ECT, revoluciones, on/off del ventilador). En la figura 5 se aprecia la pantalla del escáner automotriz, cuyos parámetros controlados en la unidad experimental durante el desarrollo del experimento se aprecian en la tabla 5.

Figura 5  
Pantalla de escáner automotriz

CURRENT DATA		28/ 31
▶MAP SENSOR.....	19.8	kPa
▶INTAKE AIR TEMP.SENSOR.	41.3	°C
▶COOLANT TEMP.SENSOR....	84.0	°C
▶THROTTLE POSITION SNSR.	663	mV
▶ENGINE SPEED.....	1523	rpm
IGNITION TIMING.....	31	°
INJECTOR DURATION-BANK1	2.4	mS
INJECTOR DURATION-BANK2	0.7	mS
INJECTOR DURATION-BANK3	2.4	mS
INJECTOR DURATION-BANK4	2.4	mS
EVAP.PURGE VALVE.....	5.9	%
FUEL PUMP RELAY.....	ON	
1: Graph		ENTER: Fix

Fuente: los autores

Tabla 5  
Características de los elementos de medición  
para la obtención de datos vibratorios

Descripción	Rango
Temperatura de ingreso del aire	41,3 - 45° C
Velocidad del motor	1 560 rpm
Sensor de temperatura del refrigerante	83,2 - 84,8° C
Ventilador	Off

Fuente: los autores

4. Analizador de gases. Es el elemento necesario para la obtención de los gases de combustión (figura 6). Se ha utilizado un modelo que permite el análisis de 4 gases contaminantes como son: HC, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO, así como también con los valores de Lambda y AFR.

Figura 6  
Analizador de gases QGA-6000

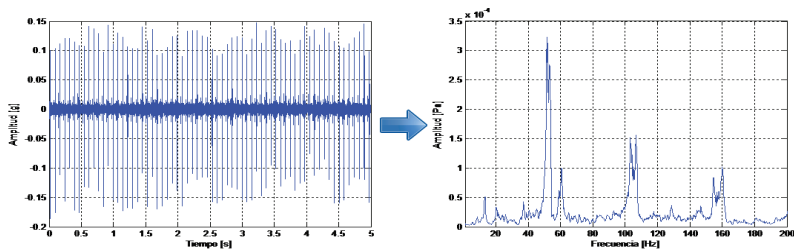


Fuente: los autores

### *Procesamiento de señales adquiridas*

Las señales transmitidas por el acelerómetro están en formato de audio (.wav), por lo tanto, todas las señales de vibración se encuentran en el dominio del tiempo (a), las mismas deberán ser transformadas al dominio de frecuencia (b) para el análisis, tal y como se muestra a continuación:

Figura 7  
Procesamiento de señales



Fuente: los autores

Para transformar una señal acústica del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia se aplica la Transformada de Fourier. La operación de la Serie de Fourier está basada en una sumatoria de señales periódicas temporales (White, 2010):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(nw_0x) + b \sin(nw_0x) \quad (1)$$

El cálculo de los coeficientes de Fourier se define como una transformada matemática del dominio de tiempo hacia el dominio de frecuencia (White, 2010), donde la ecuación (2) indica la frecuencia fundamental, mientras las ecuaciones (3), (4) y (5) permiten el cálculo de los coeficientes.

$$w_0 = \frac{2}{T} \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) dx \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

## Resultados

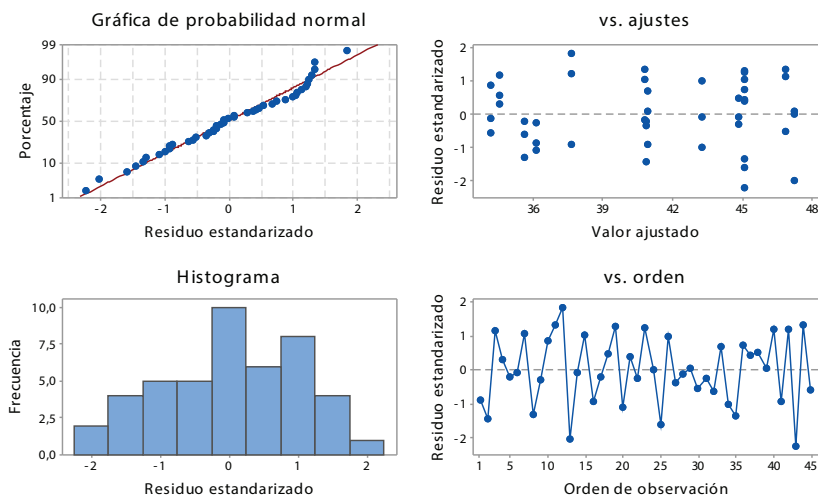
Para analizar las señales vibratorias y gases contaminantes obtenidos durante el experimento se lo realizó mediante un análisis de superficie de respuesta, análisis de gráficas factoriales, estudio de los espectros de vibración, y comparación entre resultados de una configuración a otra.

## *Análisis de superficie de respuesta*

Dentro del análisis de superficie de respuesta se realiza un ANOVA, el procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una manera de determinar si todos los grupos son parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes (MINITAB, s.f.).

El análisis de residuos nos permite determinar que el proceso de muestreo se ha efectuado correctamente. La figura 8 indica que no existen valores atípicos, varianza constante, asimetría con respecto a cero y la aleatorización de la corrida experimental en lo que refiere al análisis de vibraciones.

Figura 8  
Gráfica de residuos para Curtosis



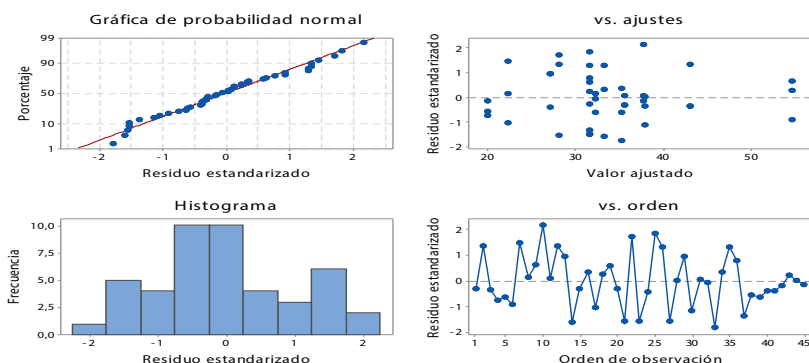
Fuente: los autores

En la figura 9a se observa la asimetría respecto a cero, un valor atípico, aleatorización de las muestras, varianza constante y valores in-

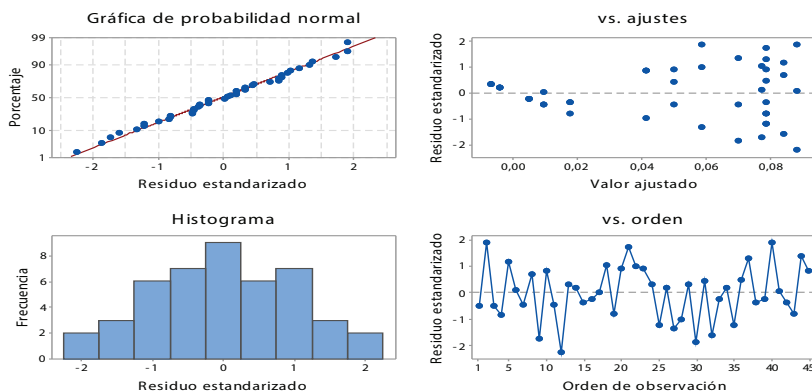
fluyentes, mientras que la figura 9b indica un valor atípico para emisiones de HC, varianza no constante, simetría de los datos con respecto a cero y la aleatorización de las muestras que fluctúan alrededor de la línea central para emisiones de CO.

Figura 9  
Residuos

a) gráfica de residuos para HC



b) gráfica de residuos para CO

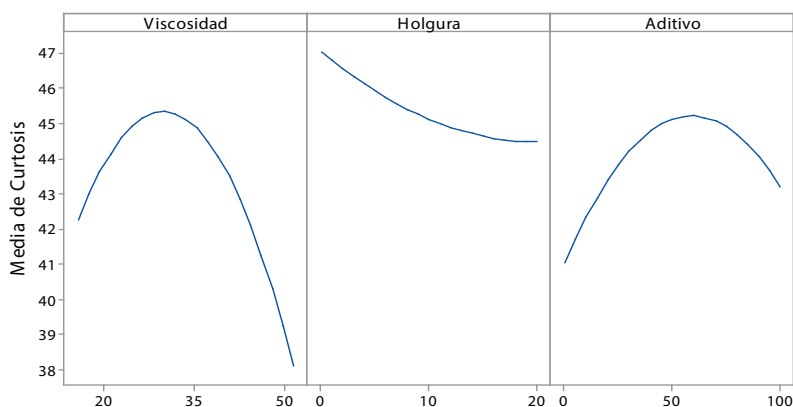


Fuente: los autores

### *Análisis de gráficas factoriales*

Mediante este análisis se verifica si existen efectos e interacción entre las variables de entrada para marcar cómo estas variables se relacionan entre sí.

Figura 10  
Gráfica de efectos principales para Curtosis



Todos los términos que se muestran están en el modelo.

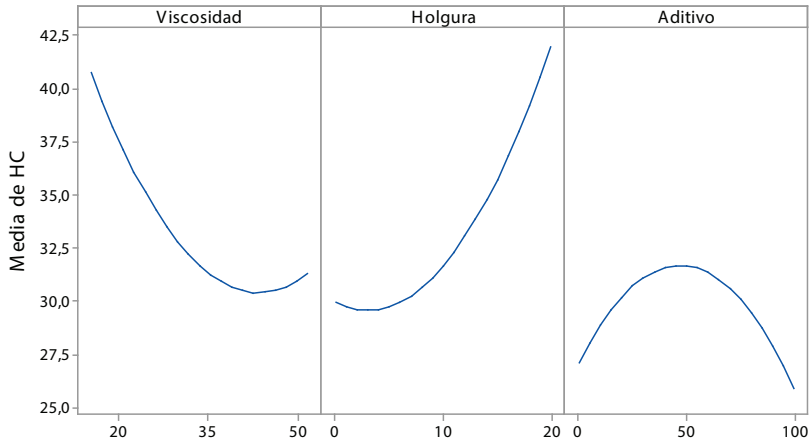
Fuente: los autores

### *Análisis de efectos principales para vibraciones*

En la figura 11 se observa que a medida que incrementa la viscosidad también incrementa la media hasta cierto punto, posterior a esto decrece hasta su nivel más bajo con el aceite de mayor viscosidad. En segundo lugar, se tiene que la media decrece a medida que la holgura aumenta. En tercer lugar se aprecia un comportamiento similar que la viscosidad, con la diferencia que la media de un aceite puro es menos que la media de un aceite con aditivo al 100%.



Figura 11  
Gráfica de efectos principales para HC



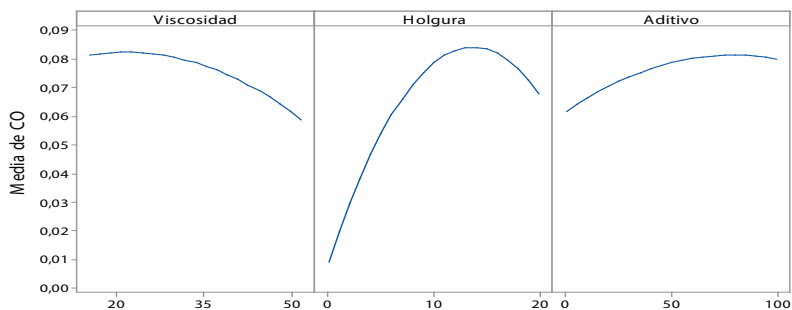
Todos los términos que se muestran están en el modelo.

Fuente: los autores

### *Análisis de efectos principales para emisiones contaminantes*

En la figura 12 se analizan los efectos principales para emisiones de hidrocarburos no combustionados (HC). En el primer caso tenemos el comportamiento de la viscosidad de manera convexa asimétrica es decir se tiene un valor mínimo entre 35 y 50. En el segundo caso con la holgura pasa algo similar que lo anterior con la diferencia que el valor mínimo se tiene entre los valores 0 y 10. En el tercer caso el comportamiento del aditivo es cóncavo, es decir, tiene un valor máximo. En la figura 13 se aprecia el comportamiento de la media con cada factor, con estos tres factores se tiene un comportamiento cóncavo, es decir que tienen una media máxima cuando se analizan efectos principales para emisión de monóxido de carbono (CO).

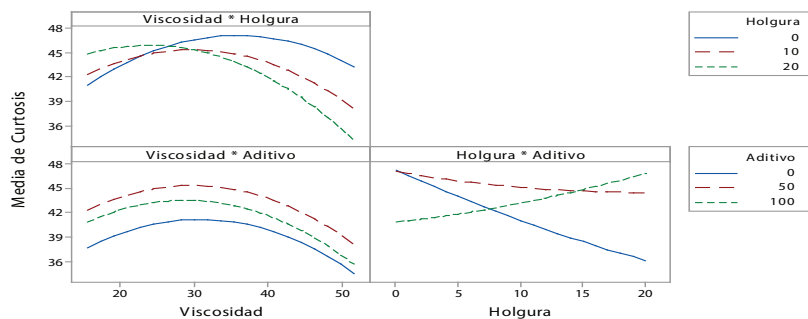
Figura 12  
Gráfica de efectos principales para CO



Todos los términos que se muestran están en el modelo.

Fuente: los autores

Figura 13  
Gráfica de interacción para Curtosis



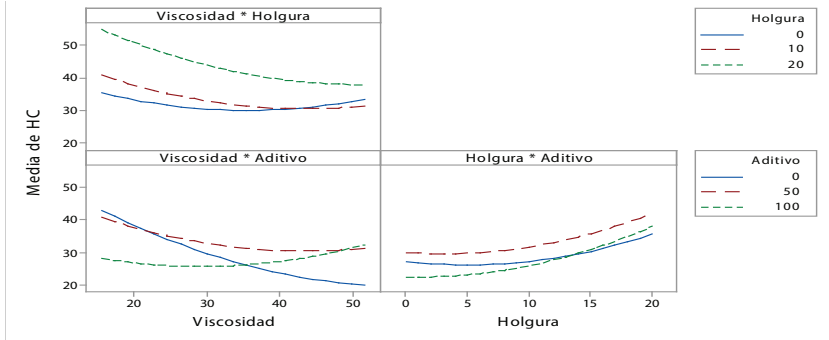
Todos los términos que se muestran están en el modelo.

Fuente: los autores

### *Análisis de interacciones para vibraciones*

En la figura 14 se observa que los factores que interaccionan son: viscosidad\*holgura y holgura\*aditivo. De esto se concluye que el aditivo utilizado y el aceite no se relacionan entre sí debido a la calidad o propiedades del aditivo.

Figura 14  
Gráfica de interacciones para HC

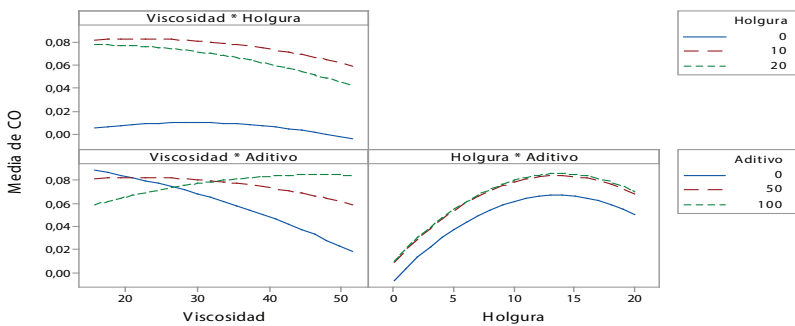


Fuente: los autores

### *Análisis de interacciones para emisiones contaminantes*

La figura 15 indica interacción entre factores: viscosidad\*holgura y viscosidad\*aditivo para las emisiones de HC, mientras que en la figura 16 se indica que existe interacción entre factores viscosidad\*aditivo.

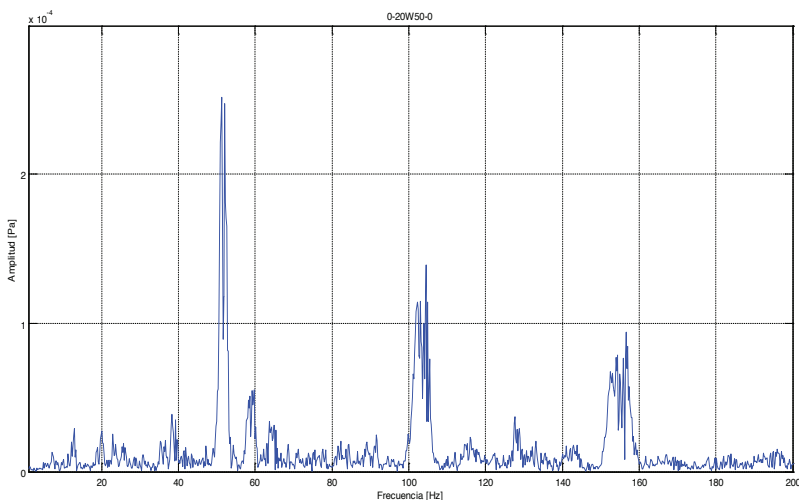
Figura 15  
Gráfica de interacciones para CO



Todos los términos que se muestran están en el modelo.

Fuente: los autores

Figura 16  
Gráfica de espectro patrón con 0% de desgaste



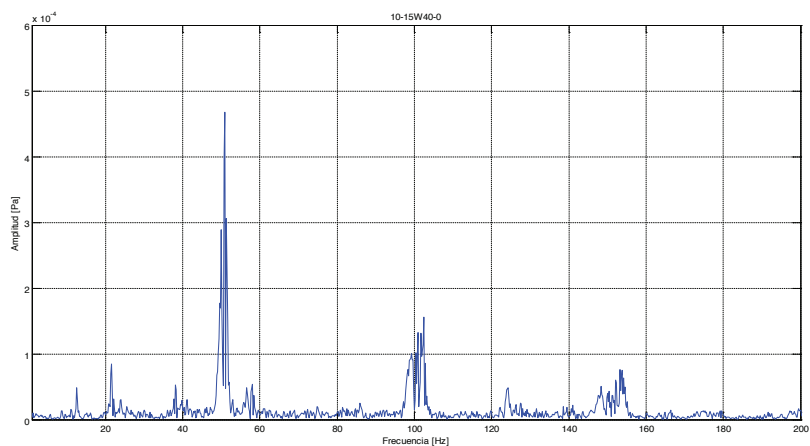
Fuente: los autores

### *Análisis de espectros patrones mediante análisis de vibraciones*

El espectro patrón se calcula obteniendo la media aritmética de las características de las señales (Buestán y Jarama, 2016) pertenecientes a cada configuración de factores, como son: el porcentaje de la holgura entre válvula y guía, el grado de viscosidad del aceite, y el porcentaje de aditivo.

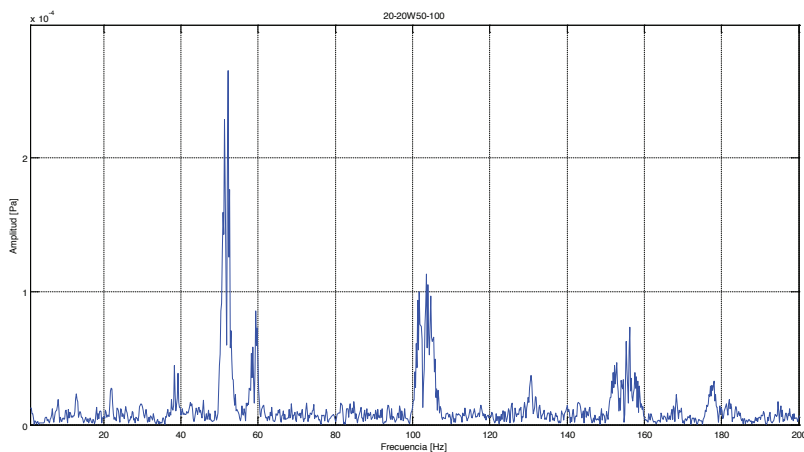
En los espectros patrones de la figuras 17, 18 y 19 se puede apreciar que la distancia entre bandas es igual. Además, se observa claramente los valores picos de amplitud en cada banda. Espectro patrón para un 0% de desgaste: aceite 20W50, 0% - aditivo (figura 17); espectro patrón para un 10% de desgaste: aceite 15W40, 0% - aditivo (figura 18); espectro patrón para un 20% de desgaste: aceite 20W50, 100% - aditivo (figura 19).

Figura 17  
Gráfica de espectro patrón con 10% de desgaste



Fuente: los autores

Figura 18  
Gráfica de espectro patrón con 20% de desgaste

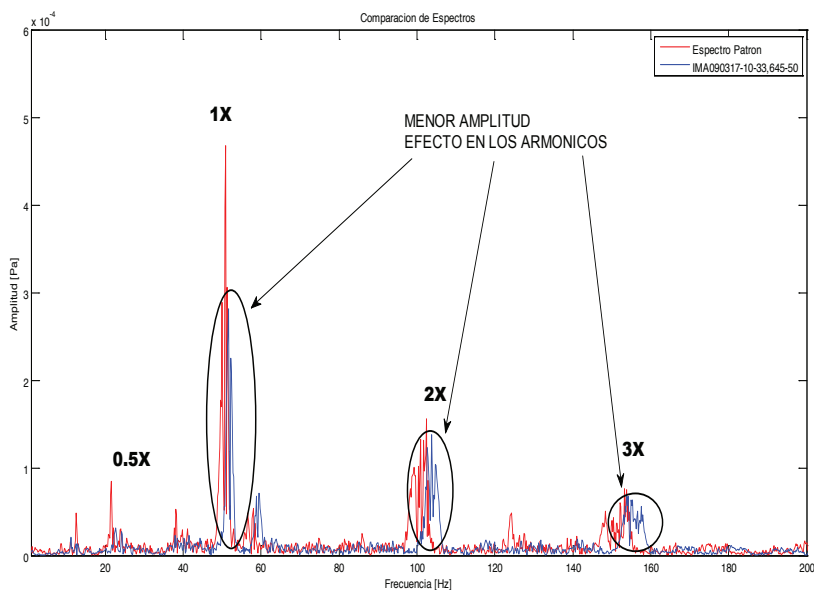


Fuente: los autores

### Comparación de espectros

1. Análisis para un 10% de desgaste. La figura 20 indica efectos sobre los armónicos, y disminución de la amplitud en la banda 1X, esto debido al grado de viscosidad que alcanza un aceite 20W50 con 50% de aditivo.

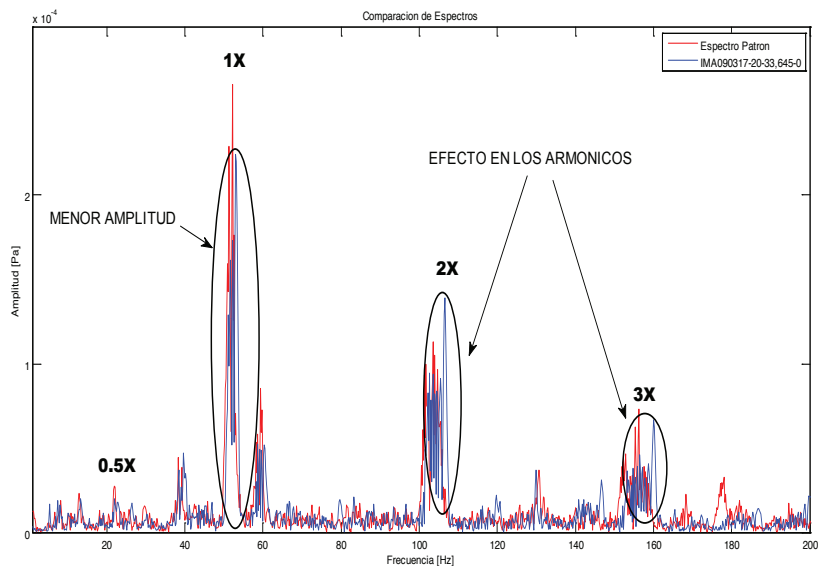
Figura 19  
Gráfica de comparación de espectros patrón  
con 0% de desgaste



Fuente: los autores

2. Análisis para un 20% de desgaste. La figura 21 indica efectos en los armónicos, como mayor distancia entre armónicos, además, de un incremento en la banda 2X, también presenta una disminución en la banda 1X, por lo cual se deduce que con un aceite 20W50 trabaja mejor.

Figura 20  
Gráfica de comparación de espectros patrón con 10% de desgaste



Fuente: los autores

## Conclusiones

En el análisis de interacciones para vibraciones los factores que tienen correlación son viscosidad\*holgura y holgura\*aditivo, mientras que para gases contaminantes indica que el HC tiene interacción con viscosidad\*holgura y viscosidad\*aditivo y el CO tiene interacción con viscosidad\*aditivo.

Con un desgaste nulo, en el análisis espectral se concluye que al incrementar la viscosidad aumentan las vibraciones; en el análisis de gases indica que al colocar un aceite 20W50 con 100% de aditivo se minimizan las emisiones contaminantes en comparación con los aceites 10W30 y 15W40, ambos con 50% de aditivo.

Al provocar un desgaste del 10% se sella con un aceite 20W50 con un 50% de aditivo, porque disminuyen las vibraciones; mediante el análisis de gases de escape se indica que con un aceite multigrado 10W30 con un 100% de aditivo se obtienen valores más bajos de emisiones contaminantes que al colocar un aceite 20W50 con un porcentaje de aditivo, caso similar ocurre al utilizar un aceite 15W40 puro o con un porcentaje de aditivo.

Con un aumento en la holgura del 20% entre vástago y guía, disminuyen las vibraciones pero no sella por completo el desgaste provocado; al analizar los gases contaminantes indica que al colocar un aceite 20W50 con un 50% de aditivo disminuyen las emisiones contaminantes.

No se cumple la hipótesis planteada debido que si la viscosidad no es adecuada, aumentan las vibraciones porque se dificulta la formación de película de aceite, además, las emisiones contaminantes se ven alteradas debido a que mientras más viscoso sea el aceite mayor energía de impulsión se necesita, la cual es obtenida directamente del poder calorífico del combustible.

## Referencias bibliográficas

- Buestán, C. y Jarama, T. (2016). *Diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna a gasolina Hyundai Accent DOHC 1.5L mediante análisis de vibraciones*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- ISO. (1995). *Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non rotating parts: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW*. Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/1553.html>.
- Hyundai. (2006). *Manual de taller del motor Accent Hyundai*. Recuperado de [https://es.scribd.com/search?page=1&content\\_type=documents&query=manuallallermotoraccenthyundai-140125200924-phpapp02](https://es.scribd.com/search?page=1&content_type=documents&query=manuallallermotoraccenthyundai-140125200924-phpapp02).
- Mahle. (2012). *Manual de fallas: fallas prematuras*. Brasil. Grupo-Mahle.
- Minitab. (2017). *Acerca de nosotros: Minitab*. Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling->



- Moresa. (2014). *Daños más frecuentes en válvulas para motores a gasolina*. México. Recuperado de <http://tumotor.mx/2014/05/danos-mas-frecuentes-en-MCIA>
- Kreysig, E. (2003). *Matemáticas avanzadas para ingeniería*. México: Limusa.
- Pickups. (2015). *Acerca de nosotros: Tav Pickups*. Recuperado de <http://www.tav.net/transductores/transductores-02.pdf> statistics/anova/basics/what-is-anova/
- White, G. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*. USA: Azima.

# Costos energéticos de los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca

---

Adrián Sigüenza

Milton García

Christian Loayza

David Idrovo

## Resumen

Esta investigación se enfocó en el análisis comparativo los costos energéticos de un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico en la ciudad de Cuenca. La investigación inicialmente contempla la falta de estudios relacionados, un desconocimiento social sobre los gastos por cada kilómetro recorrido, una recopilación de información sobre la definición de costos. Posteriormente se estableció una ruta, tomando en cuenta criterios para selección de la misma. Seguidamente se instauró un protocolo de muestreo en el cual se consideraron para nuestro análisis la utilización de vehículos de marcas comerciales en nuestro medio, se consideró que todos los vehículos vayan con dos condiciones de funcionamiento, las cuales presentan circunstancias de conducción frecuentes, fue necesario calcular las densidades de los combustibles para conocer el peso total del vehículo con tanque de combustible lleno, las cuales sirvieron para establecer una relación peso/potencia en cada vehículo con la finalidad de establecer una similitud con respecto al trabajo de los vehículos y así determinar los costos energéticos para todo el recorrido y para cada kilómetro. Finalmente, se concluyó que la utilización del vehículo eléctrico frente a un vehículo de combustión interna representa una ventaja importante al analizar los consumos energéticos.

## Palabras clave

Vehículo eléctrico, vehículo de combustión interna, altimetría, EMOlab.

## Abstract

*This research focused on the comparative analysis of the energy costs of an internal combustion vehicle and an electric vehicle in the city of Cuenca. The research initially contemplates the lack of related studies, a social ignorance about the expenses for each kilometer traveled, a compilation of information on the definition of costs. Later a route was established, taking into account criteria for its selection. Next, a sampling protocol was established in which the use of commercial vehicles in our environment was considered for our analysis. All vehicles were considered to have two operating conditions, which present frequent driving conditions, it was necessary to calculate The fuel densities to know the total weight of the vehicle with full fuel tank, which served to establish a weight / power ratio in each vehicle in order to establish a similarity with respect to the work of the vehicles, and*

*thus determine the Energy costs throughout the route and for each kilometer traveled. Finally, it was concluded that the use of the electric vehicle in front of an internal combustion vehicle represents an important advantage when analyzing the energy consumption.*

**Keywords**

*Electric vehicle, internal combustion vehicle, altimetry, EMOlab.*

## Introducción

El estudio comparativo de costos energéticos de un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico llegará a determinar los beneficios económicos que pudieran representar el uso de uno de estos vehículos. Con el avance de la tecnología, con visión a futuro, se logrará la implementación completa del vehículo eléctrico y se conseguirá disminuir las emisiones contaminantes emitidas al aire por los vehículos con motores de combustión interna a gasolina y diésel.

En el Ecuador se están incorporando cambios en la matriz energética producto de la construcción de hidroeléctricas, que han dado paso a considerar la utilización de vehículos eléctricos (VE) amigables con el medio ambiente, mismos que tienen cero emisiones contaminantes. Sin embargo, el vehículo eléctrico ha quedado relegado debido al tradicionalismo de la gente en la utilización de un vehículo de combustión interna (VCI). El gran problema es la falta de estudios comparativos de los costos operativos de un VCI frente a un VE, así como un desconocimiento social sobre los gastos por cada kilómetro recorrido que se producen en ambos tipos de vehículos.

“Se entiende por costo la suma de las erogaciones en que incurre una persona para la adquisición de un bien o servicio, con la intención de que genere un ingreso en el futuro” (Sánchez, 2007); mientras que se los denomina costos del periodo a:

Los costos que se identifican con intervalos de tiempo y no con los productos elaborados. Se relacionan con las funciones de venta y administración de la empresa. Estos costos no se incorporan a los inventarios se llevan al estado de resultados a través del renglón de gastos de venta,

gastos de administración y gastos financieros, en el periodo en el cual se incurren (Colín, 2008).

## **Selección de la ruta: UPS-La Molienda**

El turismo es un recurso importante en la ciudad de Cuenca, lugar donde se promueve viajes de todo tipo: de descanso, con motivos culturales, de interés social, de negocios o simplemente por ocio. El análisis de los criterios de movilidad está basado en investigaciones aplicadas a los actores que influyen en el turismo nacional, especialmente en lo que respecta a la provincia del Azuay, para extraer información acerca de las zonas de mayor circulación de vehículos, así como también lugares vacacionales con mayor afluencia de personas y posibles condiciones del entorno en las cuales se desenvolvería el Centro de Turismo Comunitario. Para la selección de las rutas se establecieron los parámetros de:

- Congestión y movilización vehicular
- Rutas de conexión interprovincial
- Vías de mayor afluencia vehicular
- Altimetría en las rutas a recorrer

La zona cuenta con carreteras de conexión entre provincias, lugares turísticos y centros vacacionales. Son vías con pocos semáforos y con tres carriles en cada sentido. En la ruta seleccionada se tomó en cuenta la popularidad del destino, junto con el despegue del turismo de masas desarrollado en estas últimas décadas. Las buenas condiciones naturales han propiciado desarrollos turísticos, atrayendo flujos turísticos concentrados en el tiempo y el espacio, provocando gran congestión vehicular y disminución del atractivo de estos destinos.

Se consideró como lugares turísticos a los que cuentan con mayor número de hosterías y quintas vacacionales. Esta ruta tiene carreteras de conexión interprovincial y lugares turísticos a los cuales los ciudadanos acuden.

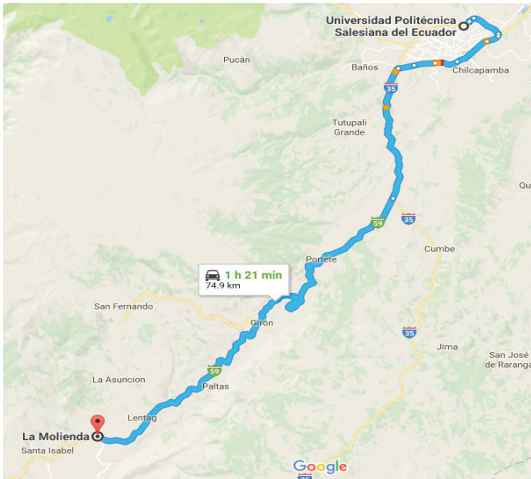
El trayecto consta de dos carriles para el flujo vehicular desde el punto de partida (Universidad Politécnica Salesiana) hasta el parador turístico La Molienda, con una longitud promedio de 74,9 km, con un límite de velocidad de 60 km/h en todo el trayecto, a excepción de la ruta en la autopista, que consta de tres carriles, y para retomar la Panamericana Sur, que consta de dos carriles. En todo ese trayecto se considera como una vía rápida con un límite de velocidad de 90 km/h.

Tabla 1  
Descripción de la ruta

Sitio de partida	Destino final	Distancia de recorrido	Tiempo estimado de recorrido	Velocidad permitida de circulación
Taller UPS	La Molienda	74,9 km	1h 21 min (ST)	60 km/h

Fuente: los autores

Figura 1  
Trayecto UPS-Yunguilla (La Molienda)



Fuente: Google Maps

Tabla 2  
Consideraciones técnicas de la ruta UPS-Yunguilla (La Molienda)

Vías a recorrer	Número de carriles por cada sentido de la vía	Ancho de carriles (m)	Velocidad de circulación (km/h)	
Calle vieja	2	4	40	
Av. de las Américas	3	4	60	
Autopista	3	4	90	
Panamericana Sur	2	4	60	
Descripción de la ruta Cuenca- Yunguilla				
Sentido Noreste-Suroeste				
Características geométricas				
Longitud: 74,9 km	Tipo de intersección: Semaforizadas (8 semáforos)		Altimetría máxima: 2 682,84 msnm	Altímetro mínima: 1 353,46 msnm
Dirección de la vía: doble vía				
Nº de carriles promedio: 4 carriles				
Selección de la ruta				
Parámetros de selección de ruta	Altimetría en las rutas a recorrer			
	Congestión y movilización vehicular			
	Vías de conexión interprovincial (comercio)			
	Vías de mayor afluencia vehicular (turismo)			
Ruta UPS-Yunguilla	Formado por rutas de interconexión interprovincial en viajes medianos y largos para activación del turismo y comercio, así como una red vial que conecta a la ciudad con otros destinos externos por medio de la red estatal Vías de mayor capacidad, diseñado para velocidades de circulación altas con límites de velocidad.			

Fuente: los autores

## Protocolo de muestreo

Para la toma de datos se consideraron vehículos comerciales en nuestro medio: Kia Sportage (2 000 cm<sup>3</sup>), Chevrolet Grand Vitara (2 000 cm<sup>3</sup>), Chevrolet Corsa Evolution (1 400 cm<sup>3</sup>). Además se consideró que todos los vehículos viajen cumpliendo dos condiciones de funcionamiento, las cuales presentan circunstancias de conducción frecuentes y constituyen parte de los hábitos de las personas al utilizar un medio de transporte:

- Radio encendida
- Vidrio del copiloto a media apertura

### *Cálculo de la densidad de combustible*

Se calculó la densidad del combustible para establecer el peso del tanque de combustible cuando se encuentra lleno.

Tabla 3  
Cálculo de la densidad del combustible

Tipo de combustible	Peso de la pipeta sin combustible (gr)	Peso de la pipeta con combustible (gr)	Masa del combustible (kg)	Volumen de la probeta (m <sup>3</sup> )	Densidad del combustible kg/m <sup>3</sup>
Gasolina súper	18,8035	26,0459	0,0072424	0,00001	724,24
Gasolina ecopaís	18,8035	26,1023	0,0072988	0,00001	729,88

Fuente: los autores

### *Cálculo de las relaciones peso/potencia*

Para la toma de datos de consideró establecer una misma relación peso/potencia en cada uno de los vehículos, con la finalidad de establecer una similitud con respecto al trabajo de los vehículos y que esta similitud dé una mayor relación con respecto a los costos energéticos de dichos vehículos. Para eso fue necesario conocer el peso de cada vehículo y así poder equilibrar las relaciones peso/potencia.

$$\text{Relación} = \text{peso (kg)} / \text{potencia (kW)} \quad (1)$$

Para el cálculo de las relaciones, el peso total de los vehículos en algunos casos no era el que se necesitaba para el análisis y el tanque de combustible en algunos vehículos no estaba completamente lleno, según lo que marcaba el indicador de combustible; por eso fue necesario el cálculo de la densidad del combustible para poder establecer el peso de los vehículos a combustión con el tanque lleno.

Tabla 4  
Peso inicial de los vehículos

Vehículo	Potencia (kW)	Combustible	Densidad del combustible (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad del tanque de combustible (litros)	Peso del vehículo con la cantidad de combustible inicial (kg)	Porcentaje de combustible en el tanque
EMoLab	90	Electricidad	-	-	1 500	-
Kia Sportage Active 2.0	104,398	Gasolina súper	724,24	55	1 510	87,23%
Grand vitara 2.0	93,9582	Gasolina ecopaís	729,88	66	1 330	43,02%
Corsa Evolution Activo 1.4	66	Gasolina ecopaís	729,88	45	1 070	100%

Fuente: los autores

Una vez conocida la densidad del combustible a emplear y la capacidad del tanque de combustible en metros cúbicos, se calculó la cantidad de combustible en kg con la que se encontraba el tanque de combustible al inicio del pesaje del vehículo. Esto fue necesario para conocer la cantidad de combustible en kg que faltaba en los vehículos para considerar en nuestro análisis el peso del vehículo con tanque de combustible lleno.

$$m = \rho * V \quad (2)$$

Donde:

$m$  = capacidad del combustible en kg

$\rho$  = densidad del combustible empleado

$V$  = capacidad del tanque de combustible en m<sup>3</sup>

Las relaciones peso/potencia de cada vehículo con su peso inicial (peso con tanque de combustible lleno) fueron muy distantes, para ello era necesario igualar las relaciones aumentando o disminuyendo el peso, en este caso el número de ocupantes en cada vehículo.



Tabla 5  
Relación peso/potencia inicial

Vehículo	Potencia (kW)	Combustible	Densidad del combustible (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad del tanque de combustible (lt)	Peso del vehículo con la cantidad de combustible inicial	Porcentaje de combustible en el tanque	Capacidad del tanque de combustible (kg)	Cantidad de combustible al inicio (kg)	Peso del vehículo con 100% de combustible (kg)	Relación (peso/potencia)
EMoLab	90	Eléctrico	-	-	1500	-	-	-	1 500	16,667
Kia Sportage Active	104,40	Gasolina súper	724,24	55	1510	87,23%	39,8332	34,7465004	1 515,09	14,464
Grand Vitara	93,96	Gasolina ecopais	729,88	66	1330	43,02%	48,1721	20,7236288	1 357,45	14,155
Corsa Evolution Activo	66	Gasolina ecopais	729,88	45	1070	100%	32,8446	32,8446	1 070	16,212

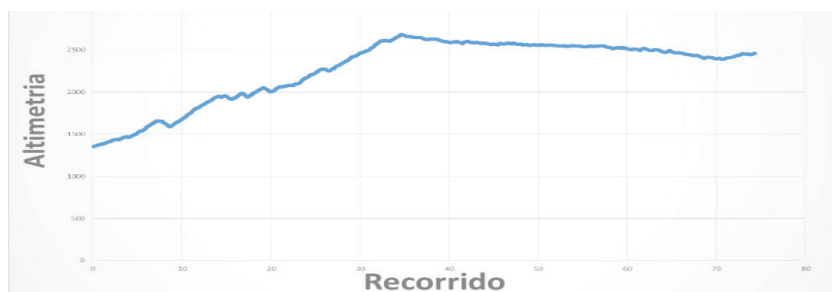
Fuente: los autores

Tabla 6  
Relación peso/potencia final

Vehículo	Potencia (kW)	Peso con tanque lleno sin conductor (kg)	Peso del conductor (kg)	Peso ocupante (kg)	Peso total (kg)	Relación (peso/potencia)
EMoLab	90	1500	90	61	1 651	18,3444444
Kia Sportage Active	104,398	1515,085	74	320,5	1 909,585	18,2913945
Grand vitara	93,9582	1357,4484	82	281	1 720,4484	18,310785
Corsa Evolution Activo	66	1070	77	66	1 213	18,3787879

Fuente: los autores

Figura 2  
Altimetría Ruta UPS-Yunguilla



Fuente: los autores

La figura 2 describe el comportamiento de los vehículos con respecto a la altimetría de la ruta. Se puede observar que dependiendo los cambios de la pendiente, esto afecta directamente en el gasto energético, tanto en los vehículos de combustión interna como en el vehículo eléctrico, en este último específicamente a su autonomía, tomando como consideración el punto más alto que se llegó sobre el nivel del mar (2 682,84 msnm) y el punto más bajo al inicio de la trayectoria (1 323,46 msnm).

## Consumo energético

Para poder corroborar que los datos obtenidos fueron los correctos se llevaron a cabo dos muestras, obteniendo como resultado velocidades promedios, consumos energéticos promedios y tiempo promedio de recorrido de los vehículos. El tipo de combustible empleado y las altimetrías máximas y mínimas en el trayecto, fueron factores que nos ayudaron a determinar el consumo energético de cada vehículo.

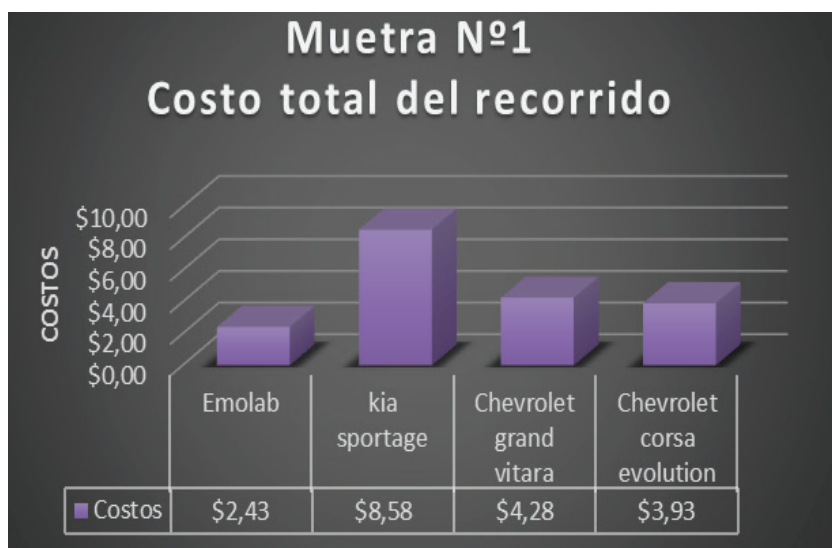
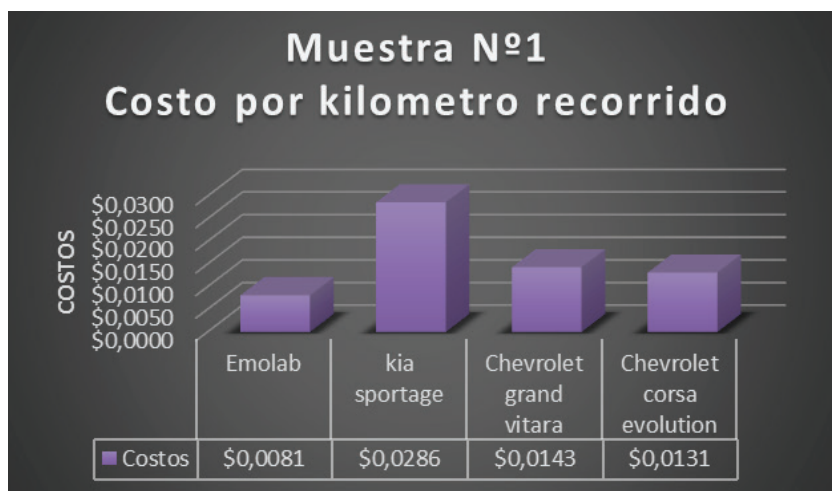
El consumo de corriente al cargar la batería del EMoLab es de 27 Amp, por lo tanto la potencia de consumo de carga con 220 V es de 5,94 kW, es decir, para 4,37 horas (tiempo promedio de carga del vehículo eléctrico de las dos muestras de datos) el consumo de energía fue de 25,98 kW. “El costo del kilovatio hora está en 0,091 ctvs.” (CENTROSUR, 2017).

Tabla 7  
Resultados de la muestra número 1

Vehículo	Ruta elegida	Velocidad (km/h)	Tipo de combustible	Tiempo total de recorrido	Altimetría máxima (msnm)	Altimetría mínima (msnm)	Distancia recorrida del vehículo (km)	Costo de consumo energético	Consumo energético costo por kilómetro recorrido
EMoLab	Cuenca - Yunguilla	51,66	Eléctrico	2:48:16	2 682,85	1 353,46	149,8	\$2,43	\$0,0081
Kia Sportage	Cuenca - Yunguilla	57,88	Gasolina súper	2:48:16	2 682,85	1 353,46	149,8	\$8,58	\$0,0286
Chevrolet Grand Vitara	Cuenca - Yunguilla	55,5	Gasolina ecopaís	2:48:16	2 682,85	1 353,46	149,8	\$4,28	\$0,0143
Chevrolet Cor- sa Evolution	Cuenca - Yunguilla	55,78	Gasolina ecopaís	2:48:16	2 682,85	1 353,46	149,8	\$3,93	\$0,0131

Fuente: los autores

Figura 3  
Costo del recorrido en la muestra 1



Fuente: los autores

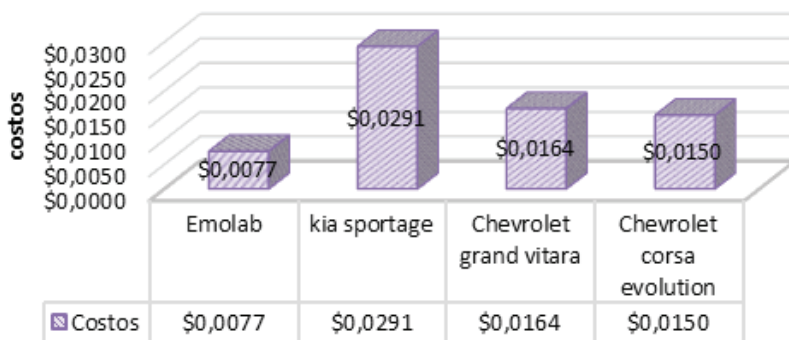
Tabla 8  
Resultados de la muestra número 2

Vehículo	Ruta elegida	Velocidad promedio (km/h)	Tipo de combustible	Tiempo total del recorrido	Altimetría máxima (msnm)	Altimetría mínima (msnm)	Distancia recorrida del vehículo (km)	Costo de consumo energético	Consumo energético costo por km recorrido
EMoLab	Cuenca - Yunguilla	52,86	Eléctrico	2:45:00	2 682,85	1 353,46	149,8	\$2,30	\$0,0077
Kia Sportage	Cuenca - Yunguilla	50,5	Gasolina Súper	2:45:00	2 682,85	1 353,46	149,8	\$8,71	\$0,0291
Chevrolet Grand Vitara	Cuenca - Yunguilla	56,27	Gasolina Ecopaís	2:45:00	2 682,85	1 353,46	149,8	\$4,90	\$0,0164
Chevrolet Corsa Evolution	Cuenca - Yunguilla	64,46	Gasolina Ecopaís	2:45:00	2 682,85	1 353,46	149,8	\$4,5	\$0,0150

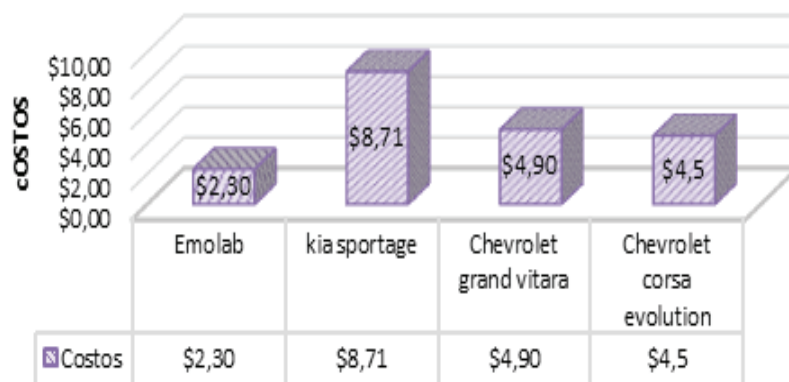
Fuente: los autores

Figura 4  
Costo del recorrido en la muestra 2

**Muestra N°2**  
**costo por kilometro recorrido**



**muestra n°2**  
**costo total del recorrido**



Fuente: los autores

Tabla 9  
Resultado final

Vehículo	Ruta elegida	Velocidad promedio (km/h)	Tipo de combustible	Tiempo total del recorrido	Altimetría máxima (msnm)	Altimetría mínima (msnm)	Distancia recorrida del vehículo (km)	Costo de consumo energético	Consumo energético costo por km recorrido
EMoLab	Cuenca - Yunguilla	52,26	Eléctrico	2:46:38	2 682,85	1 353,46	74,9	\$2,36	\$0,016
Kia Sportage	Cuenca - Yunguilla	54,19	Gasolina súper	2:46:38	2 682,85	1 353,46	74,9	\$8,65	\$0,058
Chevrolet Grand Vitara	Cuenca - Yunguilla	55,885	Gasolina ecopais	2:46:38	2 682,85	1 353,46	74,9	\$4,59	\$0,031
Chevrolet Corsa Evolution	Cuenca - Yunguilla	60,12	Gasolina ecopais	2:46:38	2 682,85	1 353,46	74,9	\$4,22	\$0,028

Fuente: los autores

Figura 5  
Resultado final



Fuente: los autores



## Conclusiones

El consumo energético en los vehículos de prueba son diferentes, pero se puede observar que en el vehículo Kia Sportage es mayor el consumo ya que el vehículo es automático y el combustible utilizado es gasolina súper. Así, el costo por kilómetro recorrido es 0,0581 es muy superior y doblaría el valor del combustible.

En el consumo energético de los vehículos de prueba a gasolina no existe diferencia, ya que son vehículos diferentes. Lo que se relacionó fue el peso/potencia para cumplir las especificaciones en los vehículos. En cambio, el consumo energético en el vehículo eléctrico EMoLab, es decir, el costo por kilómetro recorrido, es de aproximadamente 0,016 ctvs. Claramente se puede evidenciar que existe un ahorro económico al utilizarlo, que es muy relevante si comparamos el costo total de consumo energético de cada vehículo en la trayectoria escogida.

## Referencias bibliográficas

- Botia, C., Vargas, W. y Rincón, M. (2011). *Altimetría*. Bogotá: UD.
- Centrosur. (julio, 2017). *Empresa Eléctrica Regional Centrosur*. Recuperado de <http://www.centrosur.gob.ec/index.php>
- Colín, J. (2008). *Contabilidad de costos*. México: McGraw-Hill.
- Sánchez, P. Z. (2007). *Libro de contabilidad de costos*. México: McGraw-Hill
- SCIAN. (2002). *Sistema de clasificación industrial de américa del Norte*. México: Instituto Nacional de estadística y geografía INEGI.
- Thomson, I. y Bull, A. (2002). La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL*, 76(13).